

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ МІСЬКОГО  
ГОСПОДАРСТВА**

**Ф.Т. Шумаков**



# **СУПУТНИКОВА ГЕОДЕЗІЯ**

**Харків – ХНАМГ – 2009**

УДК 528.2.629.78+528.516

Конспект лекцій з дисципліни «Супутникова геодезія» (для студентів 4 курсу денної форми навчання, спеціальності 7.070900 «Геоінформаційні системи та технології»)/Авт. Шумаков Ф.Т. – Х.: ХНАМГ, 2009. – 88 с. (Укр. мов.)

Автор: Ф.Т. Шумаков

Затверджено кафедрою геоінформаційних систем і геодезії,  
протокол № 2 від «16» «09» 2009 р.

## ЗМІСТ

1. Вступ.....	5
1.1. Предмет і завдання супутникової геодезії.....	5
1.2. Виникнення і розвиток супутникової геодезії.....	6
1.3. Методи вирішення завдань супутникової геодезії.....	8
1.4. Методи спостережень ШСЗ.....	10
1.5. Розвиток сучасної супутникової геодезії.....	11
2. Системи відліку в супутниковій геодезії.....	13
2.1. Класифікація систем координат.....	13
2.2. Перетворення деяких систем координат.....	18
2.3. Системи відліку часу.....	22
3. Загальноземні системи координат.....	26
3.1. WGS-84.....	26
3.2. Система геодезичних параметрів Землі ПЗ-90.....	28
3.3. ITRS і ETRS.....	29
3.4. Параметри переходу між деякими системами координат.....	30
4. Структура СРНС.....	31
4.1. Підсистема космічних апаратів.....	31
4.2. Підсистема наземного контролю й керування.....	33
4.3. Підсистема апаратури користувачів.....	34
5. Орбітальний рух супутника в СРНС.....	36
5.1. Елементи орбіти супутника.....	36
5.2. Обчислення координат супутника.....	37
5.3. Інформація про рух супутника.....	39
6. Основи теорії супутникових вимірів (позиціонування).....	41
6.1. Загальний принцип позиціонування.....	41
6.2. Фізичні основи позиціонування.....	43
7. Методи позиціонування.....	45
7.1. Методи позиціонування.....	45
7.2. Методи супутникових вимірів.....	47

8. Побудова геодезичних мереж супутниковими методами.....	50
8.1. Планова і висотна геодезична основа для розвитку геодезичних мереж.....	50
8.2. Схеми побудови супутникових мереж.....	51
9. Проектування і планування робіт при супутникових вимірах.....	54
9.1. Складання технічного проекту.....	54
9.2. Рекогносцировка пунктів, закладка центрів.....	57
9.3. Складання робочого проекту.....	58
10. Обладнання для супутникових вимірів.....	61
10.1. Вимоги до супутникових приймачів.....	61
10.2. Перелік рекомендованого обладнання і його підготовка до роботи.....	61
11. Метрологічна атестація супутникових приймачів.....	63
11.1. Підготовка супутникових приймачів до атестації.....	63
11.2. Визначення похибки вимірювання лінійних базисів в залежності від тривалості спостережень у статичному методі.....	65
11.3. Визначення похибок вимірювання лінійних базисів в псевдокінематичному методі.....	66
11.4. Визначення похибок вимірювань збільшень координат у статичному методі по нев'язки в замкнених фігурах.....	66
11.5. Визначення похибок вимірювань координат методом «Кінематика в режимі реального часу»(RTK).....	67
12. Виконання супутникових вимірів.....	68
12.1. Статичний метод.....	68
12.2. Швидкостатичний метод.....	70
12.3. Псевдокінематичний метод.....	71
12.4. Метод Stop & Go ( «Стій – Іди»)кінематика.....	76
12.5. Кінематика в режимі реального часу (RTK - Real-Time Kinematic).....	80
13. Загальні відомості про програмне забезпечення для обробки результатів супутникових вимірювань.....	82
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	86

## 1. ВСТУП

### План лекції № 1:

1. Предмет і завдання супутникової геодезії.
2. Виникнення і розвиток супутникової геодезії.
3. Методи рішення задач супутникової геодезії.
4. Методи спостережень ШСЗ.
5. Розвиток сучасної супутникової геодезії.

### 1.1. ПРЕДМЕТ І ЗАВДАННЯ СУПУТНИКОВОЇ ГЕОДЕЗІЇ

Космічна геодезія - розділ геодезичної науки, в якому для вирішення наукових і практичних задач геодезії використовуються результати:

- спостережень штучних і природних космічних об'єктів (штучні супутники Землі (ШСЗ), Місяць) з поверхні Землі;
- спостережень, виконаних між ШСЗ;
- вимірювань, виконаних за допомогою апаратури, встановленої на борту ШСЗ.

Відповідно до цього космічна геодезія розглядає і вирішує наступні питання:

- теорія використання спостережень космічних об'єктів для рішення геодезичних задач;
- методи та засоби спостережень космічних об'єктів;
- апаратне забезпечення ШСЗ і наземних станцій для рішення геодезичних задач;
- методи визначення та уточнення орбіт ШСЗ;
- обробка та інтерпретація отриманих даних.

Основними завданнями супутникової геодезії є:

- визначення взаємного положення пунктів в деякій системі координат;
- визначення положення центру референц-еліпсоїда щодо центру мас Землі;
- визначення координат пунктів в єдиній для всієї Землі системі координат, що віднесена до центру мас Землі (геоцентричної системі координат);

- створення і підтримка на необхідному рівні точності єдиної світової геодезичної системи;
- встановлення зв'язку між відокремленими геодезичними системами;
- вивчення зовнішнього гравітаційного поля і фігури Землі;
- уточнення деяких фундаментальних геодезичних постійних, що характеризують форму, розміри і добове обертання Землі, а також визначення їх змін в часі.

Космічна геодезія тісно пов'язана з такими науковими дисциплінами, як вища геодезія, теорія фігури Землі, гравіметрія, геодинаміка, геофізика, картографія, астрономія, прикладна математика, обчислювальна техніка та програмування, електротехніка та радіоелектроніка, приладобудування та інші. З одного боку, вона використовує досягнення цих наукових дисциплін, а з іншого, надає дані, які сприяють подальшому розвитку деяких з них.

## **1.2. ВИНИКНЕННЯ І РОЗВИТОК СУПУТНИКОВОЇ ГЕОДЕЗІЇ**

Щоб краще зрозуміти, чому виникла необхідність у розвитку методів супутникової геодезії, слід зупинитися на деяких моментах з історії геодезії.

Відомо, що різні геодезичні роботи виконувалися людьми з глибокої давнини. Одними з перших відомих нам геодезистів були єгиптяни. Вони використовували для відновлення зруйнованих розливами Нілу меж земельних угідь опорні пункти, які знаходилися далеко від річки. Також важливе значення мало орієнтування і визначення місця розташування в сухопутних і морських подорожах.

У міру розвитку людства підвищувалися вимоги до точності геодезичних робіт, удосконалювалися методи і техніка вимірювань, способи обробки вимірювальної інформації.

Важливе значення для розвитку геодезії мало пропозиція голландського вченого Снелліуса (1580-1626 рр.) використовувати як метод передачі координат триангуляцію. У 1615-1617 рр. Снелліус виконав у Голландії градусний вимір по

дузі меридіана, що складається з 33 трикутників і має протяжність близько 130 км.

У XX столітті для створення геодезичного обґрунтування, поряд з тріангуляції, стала застосовуватися полігонометрія. Її розвиток стимулювало широке впровадження в геодезичне виробництво радіо-і світлодальноміри. Їх використання дозволило створювати геодезичні побудови методом трілатерації (шляхом вимірювання довжин сторін трикутників).

Традиційні геодезичні побудови створювалися на окремих, розділених значними водними перешкодами або державними кордонами територіях. За ним були утворені геодезичні референцної системи. До їх числа відносяться референц-еліпсоїди Бесселя, Кларка, Красовського, Хейфорда та ін. (всього понад 10). Положення референц-еліпсоїдів, що утворюють геодезичні системи на різних континентах, щодо один одного і центру мас Землі не можна встановити за допомогою тільки тріангуляції і полігонометрії.

Обмежені можливості класичних методів у сенсі передачі координат обумовлені порівняно невеликими граничними довжинами сторін тріангуляції і полігонометрії (20-30 км), а також вимогою взаємної видимості між пунктами. Для цього пункти будувалися на вершинах гір, а на рівнинній місцевості встановлювалися спеціальні сигнали.

У 1768 році Йоганн Ейлер (син Леонарда Ейлера) опублікував роботу, в якій обґрунтував можливість визначення параметрів земного еліпсоїда з одночасним вимірювань зенітних відстаней Місяця з пунктів, розташованих на одному меридіані і мають відомі астрономічні координати.

З початку XX століття увагу до так званих «місячним» методів посилювався, і космічна геодезія стала оформлятися як розділ геодезичної науки. Були спроби використовувати для рішення геодезичних задач результати спостережень моментів покрить зірок Місяцем, сонячних затемнень і фотографування Місяця на тлі зірок. Через значне видалення Місяця від Землі (у середньому 384 000 км) місячні методи не дозволяють досягти необхідної в даний час для рішення геодезичних задач точності. Наприклад, застосування фотографування Місяця

на тлі зірок (найбільш точного з названих методів) забезпечує отримання координат пунктів спостережень з помилкою приблизно 100 м.

У 1946 р. фінський геодезист Ю. Вайсяля розробив принципи побудови триангуляції шляхом фотографування спалахів світла на тлі зірок. Для цього джерело світла піднімали на значну висоту літаком, газовим балоном або ракетою і по команді з Землі він давав короткочасні спалахи. З двох пунктів на поверхні землі виконувалося синхронне фотографування двох і більше спалахів світла в різних вертикальних площинах, за результатами якого можна було з високою точністю визначити напрямок хорди, що з'єднує пункти спостережень. Якщо таким чином визначити напрямки хорд, що з'єднують всі пункти спостережень, то можна вирахувати координати останніх. Для цього необхідно знати координати хоча б одного з пунктів і довжину хоча б однієї хорди. Що проводилися в ряді країн експерименти по створенню таких побудов показали, що при сторонах 100-300 км зоряна триангуляція дозволяє отримувати результати досить високої точності (помилка напрямки хорди становить 0,5-1,5). Проте відстані між пунктами були обмежені висотою балонів з лампами-спалахами, які могли підніматися на висоту до 30-40 км.

Із запуском в СРСР 4 жовтня 1957 перший в світі штучного супутника Землі з'явилася можливість створювати космічні побудови, засновані на спостереженнях ШСЗ. Вимірювання доплерівського зсуву частоти передавача цього супутника на пункті спостереження з відомими координатами дозволили визначити параметри руху ШСЗ. Зворотній завдання була очевидною: з вимірювань одного і того ж доплерівського зрушення при відомих координатах ШСЗ знайти координати пункту спостереження.

### **1.3. МЕТОДИ РІШЕННЯ ЗАДАЧ СУПУТНИКОВОЇ ГЕОДЕЗІЇ**

Якщо розглядати методи супутникової геодезії в послідовності розвитку, то перший слід вважати геометричний метод. Він заснований на синхронному фотографуванні ШСЗ на тлі зоряного неба з двох пунктів (як мінімум) на поверхні Землі, що дозволяє визначити складові вектора, що з'єднує ці пункти.



Безліч таких векторів утворює векторну просторову мережу - супутникову (космічну) тріангуляцію. Обробка і зрівняння цієї мережі дають можливість визначати координати нових пунктів в системі координат вихідних пунктів.

У силу великих висот спостережуваних супутників виявилося можливим створення мереж супутникового тріангуляції зі сторонами порядку 1500-2000 км, що, в свою чергу дозволило зв'язати материки і острови Землі єдиної глобальної геодезичної мережею.

Перевагою геометричного методу є можливість виключити з розгляду теорію руху ШСЗ і разом з нею такі трудноучітываемие фактори як обурення орбіт ШСЗ, викликані аномальним гравітаційне поле планети, впливом тяжіння Місяця і Сонця, тиском сонячного випромінювання і т. п.

Недоліком цього методу є те, що в результаті визначаються тільки лише відносні координати нових пунктів в системі вихідних пунктів, без прив'язки до центру мас Землі.

Тому найбільш загальним методом супутникової геодезії слід вважати динамічний метод, який заснований на вивченні зміни орбіти ШСЗ в часі. Динамічний метод набагато складніше геометричного, тому що для його реалізації необхідно мати у своєму розпорядженні адекватної моделлю руху ШСЗ. Точність результатів у значній мірі залежить від точності обліку факторів, що впливають на рух ШСЗ: сили ваги, впливу тяжіння Місяця і Сонця, тиск сонячного випромінювання та ін.

Динамічний метод дозволяє отримати положення пунктів в єдиній для всієї планети системі координат з початком у центрі мас Землі і визначити зовнішнє гравітаційне поле Землі. Особливо важливе значення має визначення параметрів гравітаційного поля Землі, які служать джерелом інформації для вивчення внутрішньої будови планети. Параметри визначаються з аналізу збурень орбіт ШСЗ.

Реалізація динамічного методу потребує виконання значного обсягу обчислень для спільного визначення координат наземних пунктів, елементів

орбіт ШСЗ та уточнення параметрів моделей збурюючих сил методом послідовних наближень.

У разі визначення тільки лише координат пунктів та поправок до елементів орбіти без визначення та уточнення параметрів гравітаційного поля Землі, динамічний метод називається орбітальним. У орбітальному методі параметри гравітаційного поля використовуються як вихідні. У динамічному і орбітальному методі не потрібна синхронізація спостережень з наземних пунктів на ШСЗ.

#### **1.4. МЕТОДИ СПОСТЕРЕЖЕНЬ ШСЗ**

Перші ШСЗ використовувалися переважно для отримання загальної інформації про навколоземному просторі. Надалі з'явилися супутники, призначені для вирішення конкретних спеціальних завдань. В даний час відповідно до спеціалізації можна навести наступну класифікацію супутників: зв'язки, метеорологічні, навігаційні, геодезичні, океанографічні, ресурсні (призначені для дослідження природних ресурсів), астрономічні, військові.

ШСЗ, які спостерігають у відбитому сонячному світлі, називають пасивними. Супутники, які мають на борту імпульсні лампи-спалаху і (або) передавальну спеціальну апаратуру, називають активними. Особливе місце займають супутники, оснащені уголковими відбивачами для лазерних спостережень.

Методи спостережень ШСЗ зазвичай поділяються на оптичні і радіотехнічні (радіоелектронні).

До оптичним відносяться візуальні, фотографічні, фотоелектричні і лазерні спостереження. До радіоелектронним - інтерференційні, доплерівські, дальномірні. В даний час часто застосовуються комбіновані методи радіоелектронних спостережень.

Оптичні методи вимагають наявності прямої видимості між пунктом і супутником, а також певного взаємного положення пункту, супутника і Сонця. Остання вимога вносить суттєві обмеження при спостереженні пасивних супутників.

Радіоелектронні методи можуть застосовуватися в будь-яких метеорологічних умовах (дощ, туман тощо) і в будь-який час доби.

У радіотехнічних методи спостережень розрізняють Запитальний і беззапитний способи. У запитному способі порівнюють частоти, які випромінює наземним передавачем і перевипромінюють поміщенням на супутнику приємовідповідачем коливань. У беззапитному способі що знаходиться на борту супутника передавач випромінює коливання високостабільної частоти, які приймаються наземним приймачем. Частота прийнятих коливань порівнюється в приймачі з частотою еталонного генератора.

## **1.5. РОЗВИТОК СУЧАСНОЇ СУПУТНИКОВОЇ ГЕОДЕЗІЇ**

Даний курс вивчає один з напрямків супутникової, геодезії - використання глобальних супутникових радіонавігаційних систем (СРНС) для рішення геодезичних задач. Цей напрямок є найбільш поширеним і масовим в геодезичному виробництві. Супутникові приймачі вже сьогодні широко застосовуються в багатьох геодезичних підрозділах України для оновлення геодезичних мереж, прив'язки аерофотознімків, топографічних і кадастрових зйомок та інших видів робіт.

Безпосередньою попередницею сучасних систем визначення місця розташування є беззапросная СРНС військово-морського флоту США NNSS (Navy Navigation Satellite System), пізніше отримала назву ТРАНЗИТ. Її експлуатація була розпочата в 1964 р. Система складалася з шести супутників, розташованих на майже кругових полярних орбітах з висотою близько 1100 км над поверхнею Землі. Система ТРАНЗИТ була розроблена військовими США в першу чергу для визначення координат кораблів і літаків. У 1967 р. було дозволено цивільне використання цієї системи, і вона стала широко використовуватися по всьому світу для цілей навігації та геодезії.

З 1979 р. в СРСР почалася експлуатація аналогічної системи під назвою ЦИКАДА. Вона складалася з чотирьох навігаційних супутників, виведених на кругові орбіти висотою 1000 км. Ця система дозволяла споживачам в середньому через кожні півтори-дві години входити в радіоконтакт з одним із

супутників і визначати планові координати свого місця розташування при тривалості сеансу 5-6 хв.

Пізніше супутники системи ЦИКАДА були дообладнані приймальні вимірювальною апаратурою виявлення потрапити у біду об'єктів, оснащених спеціальними радіобуями, і вони утворили систему "КОСПАС". Спільно з американсько-франко-канадською системою САРСАТ вони утворюють єдину службу пошуку і порятунку КОСПАС-САРСАТ.

Основними недоліками системи ТРАНЗИТ і ЦИКАДИ були великі перерви між проходженнями супутників і порівняно невисока навігаційна точність (близько 100 м), в результаті чого виникла необхідність створення універсальної навігаційної системи, що задовольняє вимогам усіх потенційних споживачів: авіації, морського флоту, наземних об'єктів і космічних кораблів. Така СРНС повинна була б у будь-який момент забезпечувати користувачам можливість визначати три просторові координати, вектор швидкості і точний час.

Ці можливості були реалізовані в СРНС GPS NAVSTAR (США) та ГЛОНАСС (Росія), розроблених незалежно один від одного.

## **2. СИСТЕМИ ВІДЛІКУ У СУПУТНИКОВІЙ ГЕОДЕЗІЇ**

### **План лекції № 2**

1. Класифікація систем координат.
2. Перетворення деяких систем координат.

### **План лекції № 3**

1. Перетворення деяких систем координат (продовження).
2. Системи відліку часу.

### **2.1. КЛАСИФІКАЦІЯ СИСТЕМ КООРДИНАТ**

Для вирішення завдань супутникової геодезії застосовуються різні системи координат. Вони відрізняються за формою їх завдання: прямокутні (плоскі або просторові) або криволінійні (сферичні і еліпсоїдальної). Принципові відмінності систем координат пов'язані з вибором початку відліку координат, основної площини та орієнтування головної осі координат.

Системи координат різняться між собою:

За формою координат:

1) прямокутні (рис. 1):

За основну площину  $XOY$  у цьому випадку (рис. 1) прийнята площина земного екватора. Основна координатна вісь  $OX$  спрямована в певну точку. Ось  $OY$  розташована в площині земного екватора під кутом  $90^\circ$  на схід від прийнятого початкового меридіана. Ось  $OZ$  поєднана з північним напрямком осі обертання Землі.

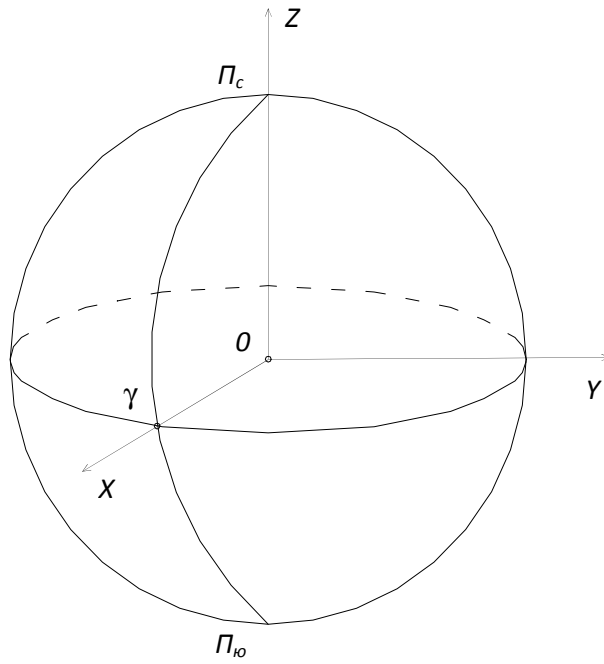


Рис. 1

2) сферичні (зіркові) (рис. 2):

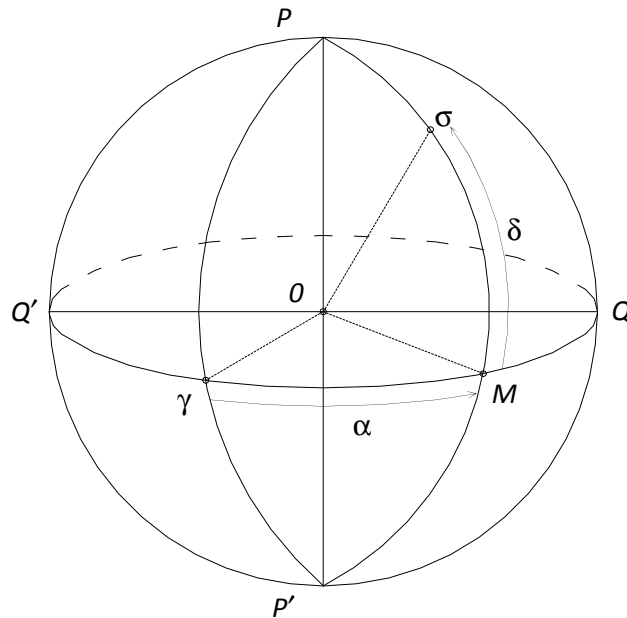


Рис. 2

$\alpha$  - пряме сходження, відраховується по дузі небесного екватора  $Q'Q$  від точки весняного рівнодення  $\gamma$  проти ходу годинникової стрілки до точки  $M$ , що є підставою кола відмін  $P\sigma P'$  і вимірюється в годинній мірі від 0 до 24h;

$\delta$  - відмінювання, відраховується уздовж кола відмін від небесного екватора  $Q'Q$  до об'єкту  $\sigma$  і вимірюється в градусній мірою від  $-90$  до  $+90^\circ$  (Знак  $+$  відповідає положенню об'єкта в північній півкулі небесної сфери, знак  $-$  - у південному).

$\gamma$  - точка весняного рівнодення, перетин небесного екватора і екліптики.

3) еліпсоїдальної (геодезичні) (рис. 3):

$B$  - геодезична широта, кут між нормаллю до еліпсоїда, проведеної через задану точку  $M$  на поверхні Землі, і площиною екватора;

$L$  - геодезична довгота, двогранний кут між площинами Гринвіцьким  $G$  і заданого геодезичного меридіанів;

$H$  - геодезична висота над референц-еліпсоїдом, відстань по нормалі від поверхні еліпсоїда до точки  $M$ .

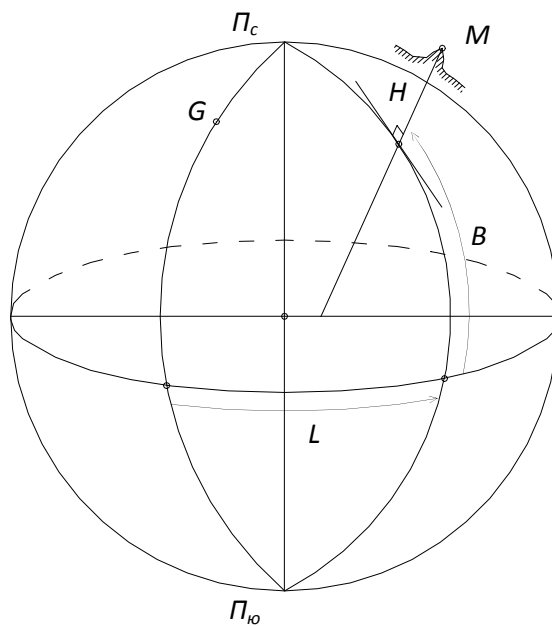


Рис. 3

За розташуванням початку відліку (рис. 4):

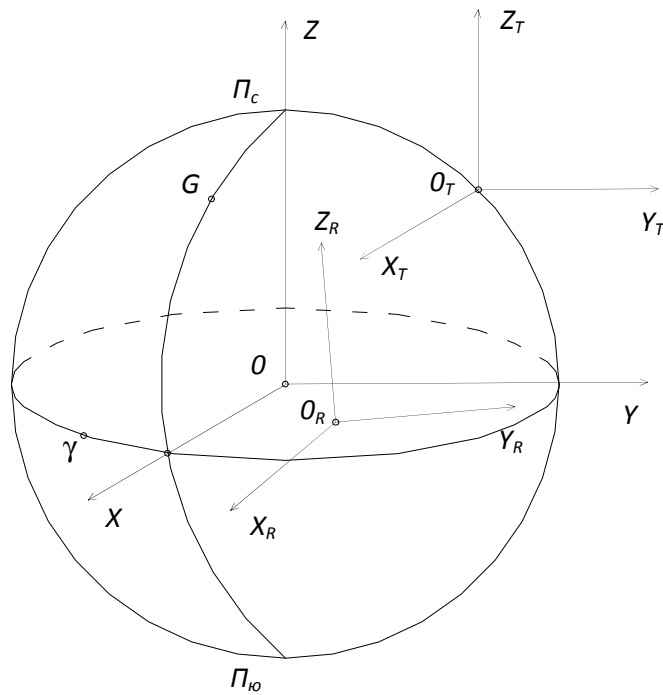


Рис. 4

- 1) геоцентричні  $X, Y, Z$ , з початком відліку у центрі мас Землі;
- 2) референцної (квазігеоцентричеськіє)  $X_R, Y_R, Z_R$ , з початком поблизу центру мас Землі, в центрі прийнятого референц-еліпсоїда;
- 3) топоцентричеськіє  $X_T, Y_T, Z_T$ , з початком відліку на поверхні Землі в точці спостереження.

За вибору основної (фундаментальної) координатної площини  $XOY$ :

- 1) екваторіальні - в площині екватора на певну епоху;

Розрізняють першому і другому екваторіальні системи координат. Перша є що обертається, тобто бере участь у добовому обертанні Землі, друга - нерухома, тобто не бере участь у добовому обертанні Землі.

- 2) горизонтальні - у площині місцевого горизонту;
- 3) орбітальні - у площині орбіти.

За орієнтування площині  $XOZ$ :

- 1) інерціальні (рівноденні) (рис. 1)



Площина  $XOZ$  проходить через точку весняного рівнодення  $\gamma$ , тобто вісь  $OX$  спрямована в точку  $\gamma$ , а вісь  $OZ$  співпадає з віссю обертання Землі або паралельна їй. У інерціальній сферичній системі координати  $\alpha$  - пряме сходження і  $\delta$  - відмінювання наводяться у фундаментальних (зоряних) каталогах, наприклад FK5 на епоху 2000 року. Координати точок земної поверхні зазвичай не ставлять в інерціальній сферичній системі, так як унаслідок добового обертання Землі пряме сходження  $\alpha$  не є постійним і залежить від часу.

## 2) Грінвіцький (рис. 4)

Площина  $XOZ$  збігається або паралельна площині за Гринвіцьким меридіаном. Вісь  $OX$  визначається перетином площини екватора і площини за Гринвічем меридіана. Вісь  $Y$  перпендикулярна осі  $X$  і доповнює систему координат до правою. Перехід від інерціальній системи координат до Грінвіцькій здійснюється поворотом інерціальній системи навколо осі  $Z$  на кут, чисельно рівний істинному зоряного часу  $S$  в Гринвічі.

В обох системах як осі  $Z$  виступає вісь обертання Землі. Так як вона здійснює безперервні коливальні рухи (прецесія і нутація), то положення осі  $Z$  умовно фіксують на певний момент часу, що називається епохою.

За існуючої угоди вісь  $Z$  в інерціальній системі збігається з положенням осі обертання в стандартну епоху, віднесену до початку 2000 року. Вісь  $X$  спрямована у відповідну точку весняного рівнодення.

У земній системі координат вісь  $Z$  збігається із середнім положенням осі обертання Землі. Це положення називають міжнародним умовним початком МУН, СІО (Conventional International Origin). Історично МУН відповідає середньому положенню осі обертання Землі за період 1900-1905 рр.. Залежно від часу, до якого належить положення точки весняного рівнодення  $\gamma$  і напрямок осі  $Z$ :

- 1) середні, прийняті на певну епоху (наприклад на епоху 2000 року);
- 2) істинні, віднесені до істинної точці весняного рівнодення;
- 3) миттєві, відповідні положення осі обертання на момент спостереження.

## 2.2. ПЕРЕТВОРЕННЯ ДЕЯКИХ СИСТЕМ КООРДИНАТ

Перетворення геодезичних (еліпсоїдальної) координат  $B, L, H$  в прямокутні (просторові) координати  $X, Y, Z$ .

$$\begin{aligned}X &= (N + H) \cos B \cos L \\Y &= (N + H) \cos B \sin L \\Z &= (N(1 - e^2) + H) \sin B\end{aligned}\quad (1)$$

де  $B$  і  $L$  - відповідно геодезичні широта і довгота пункту,  $H$  - висота пункту над прийнятим референц-еліпсоїдом;

$N$  - радіус кривизни першого вертикалі:

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}} \quad (2)$$

$e$  - ексцентриситет меридіанного еліпса:

$$e = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a} \quad (3)$$

$a$  і  $b$  - велика і мала півосі еліпсоїда.

Перетворення прямокутних (просторових) координат  $X, Y, Z$  в геодезичні (еліпсоїдальні) координати  $B, L, H$ .

Для зворотного переходу від просторових координат  $X, Y, Z$  до геодезичним  $B, L, H$  виконуються ітерації при обчисленні широти  $B$  і висоти  $H$  з використанням наступного алгоритму.

1) Допоміжна величина  $D$  обчислюється за формулою:

$$D = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (4)$$

2) Аналізують значення  $D$ :

якщо  $D = 0$ , то

$$B = \frac{\pi}{2} \frac{Z}{|Z|}, L = 0, H = Z \sin B - a \sqrt{1 - e^2 \sin^2 B} \quad (5)$$

якщо  $D > 0$ , то

$$L_a = \arcsin\left(\frac{Y}{D}\right); \quad (6)$$

при цьому

якщо  $Y < 0, X > 0$ , то  $L = 2\pi - L_a$

если  $Y < 0, X < 0$ , то  $L = \pi + L_a$

якщо  $Y > 0, X < 0$ , то  $L = \pi - L_a$

якщо  $Y > 0, X > 0$ , то  $L = L_a$

3) Аналізують значення  $Z$ :

якщо  $Z = 0$ , то

$$B = 0, H = D - a$$

У всіх інших випадках використовується наступна схема обчислень:

1) Знаходять допоміжні величини  $r, c, p$  за формулами:

$$r = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}, \quad (7)$$

$$c = \arcsin\left(\frac{Z}{r}\right), \quad (8)$$

$$p = \frac{e^2 a}{2r}. \quad (9)$$

3) реалізують ітеративний процес:

$$\begin{aligned} s_1 &= 0, \\ b &= c + s_1, \end{aligned} \quad (10)$$

$$s_1 = \arcsin\left(\frac{p \sin(2b)}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 b}}\right);$$

якщо модуль різниці  $|s_2 - s_1|$  менше заданого  $\varepsilon$ , то

$$\begin{aligned} B &= b, \\ H &= D \cos B + Z \sin B - a\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}. \end{aligned} \quad (11)$$

В іншому випадку прирівнюють  $s_1 = s_2$  і обчислення повторюють, починаючи з обчислення  $b$ . Значення  $\varepsilon$  у всіх випадках приймається рівним 0,0001 ", що забезпечує погрішність обчислення  $H$  не більше 0,003 м. Перетворення геодезичних координат  $B$  і  $L$  в плоскі прямокутні координати  $x$  і  $y$

Плоскі прямокутні координати  $x$  і  $y$  з похибкою не більше 0,001 м в прийнятій на території України проекції Гауса-Крюгера по геодезичним координатами на еліпсоїді Красовського обчислюються за формулами:

$$\begin{aligned} x = & 6367558,4698B - \\ & - \sin(2B)(16002,8900 + 66,9607 \sin^2 B + 0,3515 \sin^4 B - \\ & - l^2(1594561,25 + 5336,535 \sin^2 B + 26,790 \sin^4 B + 0,149 \sin^6 B + \\ & + l^2(672483,4 - 811219,9 \sin^2 B + 5420,0 \sin^4 B - 10,6 \sin^6 B + \\ & + l^2(278194 - 830174 \sin^2 B + 572434 \sin^4 B - 16010 \sin^6 B + \\ & + l^2(109500 - 574700 \sin^2 B + 863700 \sin^4 B - 398600 \sin^6 B)))))) \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} y = & (5 + 10n)10^5 + \\ & l \cos B(6378245 + 21346,1415 \sin^2 B + 107,159 \sin^4 B + 0,5977 \sin^6 B + \\ & + l^2(1070204,16 - 2136826,66 \sin^2 B + 17,98 \sin^4 B - 11,99 \sin^6 B + \\ & + l^2(270806 - 1523417 \sin^2 B + 1327645 \sin^4 B - 21701 \sin^6 B + \\ & + l^2(79690 - 866190 \sin^2 B + 1730360 \sin^4 B - 945460 \sin^6 B)))) \end{aligned} \quad (13)$$

У формулі (12) значення  $B$  виражають у радіани мірою. У формулі (13)  $n$  - номер шестиградусной зони в проекції Гауса-Крюгера. Величина  $l$  обчислюється в радіани мірою за формулою

$$l = \frac{L - (3 + 6(n - 1))}{57,29577951} \quad (14)$$

Перетворення прямокутних просторових координат із системи  $A$  в систему  $B$ .

Просторові прямокутні координати двох систем ( $A$  і  $B$ ), у яких відрізняються початок координат, орієнтування осей і лінійний масштаб, зв'язані наступними співвідношеннями:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_B = (I + m) \begin{pmatrix} I & +\omega_Z & -\omega_Y \\ -\omega_Z & I & +\omega_X \\ +\omega_Y & -\omega_X & I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_A + \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix} \quad (15)$$

Зворотне перевичислення, із системи  $B$  в систему  $A$ , виконується за формулами:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_A = (I - m) \begin{pmatrix} I & -\omega_Z & +\omega_Y \\ +\omega_Z & I & -\omega_X \\ -\omega_Y & +\omega_X & I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_B - \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix} \quad (16)$$

де  $m$  - масштабний коефіцієнт при переході від системи до системи  $A$   $B$ ;  $\omega_X, \omega_Y, \omega_Z$  - кутові елементи трансформування, кути обертання осей системи  $A$ , що забезпечують їх паралельність осей системи  $B$ ;

$\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$  - лінійні елементи трансформування, зміщення початку системи координат  $A$  щодо системи  $B$ .

Наведені вище формули називаються формулами Гельмерта, а власне перетворення - перетворенням Гельмерта по 7-ми параметрами.

Перетворення висот.

Різниця висот, які застосовуються в геодезії, пов'язане з відліковий поверхнею (еліпсоїд, квазігеоїд, геоїд). Висоти відраховуються від точки на земній поверхні до вибраної поверхні по стрімкої лінії (нормалі) до неї.

Геодезична (еліпсоїдальної) висота - відстань від точки на земній поверхні до поверхні референц-еліпсоїда.

Нормальна висота - відстань від точки на земній поверхні до поверхні квазігеоїда.

Ортометрическая висота - відстань від точки на земній поверхні до поверхні геоїда.

Геодезична висота  $H$  і нормальна висота  $H^\gamma$  пов'язані співвідношенням:

$$H = H^\gamma + \zeta \quad (17)$$

де  $\zeta$  - висота квазігеоїда (геоїда) над відліковим еліпсоїдом.

Висоти квазігеоїда (геоїда) над відліковим еліпсоїдом обчислюються за моделями гравітаційного поля Землі, що входять до складу параметрів загальноземних систем координат.

Для обчислення нормальних висот, зазвичай використовуються в практиці геодезичних робіт, необхідно мати карти висот квазігеоїда або гравіметричні визначення, точність яких визначає точність перевичислення.

### 2.3. СИСТЕМИ ВІДЛІКУ ЧАСУ

Одиниці відліку часу, що застосовуються при супутникових вимірах, можна розділити на дві групи - астрономічні та неастрономічні. Повний оборот Землі навколо своєї осі ставить одиницю часу, звану добами (приблизно 86 400 сек) - основну астрономічну одиницю часу. Оберти Землі фіксуються щодо напрямку на будь-яку зірку або направлення на центр Сонця.

Повний оберт Землі навколо осі щодо напрямку на будь-яку зірку називають зоряними цілодобово. У якості "індексу" (початку) отсчитивання обертів Землі прийнято використовувати замість тієї чи іншої зірки точку весняного рівнодення  $\gamma$ . Проміжок часу від точки відліку називається зоряним часом.

Звичайний час, виміряний на меридіані даного місця, називається місцевим часом даного меридіана.

Повний оберт Землі навколо своєї осі щодо напрямку на центр Сонця називають істинними сонячними цілодобово. За їх початок беруть опівночі. Справжні сонячні добу не відповідають одному з основних вимог до одиниць виміру часу. Вони мають різну тривалість протягом року з-за нерівномірного руху Землі навколо Сонця і нахилу її орбіти до площини небесного екватора. Різниця може досягати 50 сек, тому за основну одиницю часу беруть середні сонячні добу, які відраховуються щодо «середнього Сонця» - гіпотетичної точки, розрахованої в припущенні її рівномірного руху по орбіті. «Середнє Сонце» робить один повний оберт по небесному екватору за такий же час, як і справжнє Сонце по екліптиці, і проходить точку весняного рівнодення одночасно з Сонцем. Проміжок часу від моменту нижньої кульмінації «середнього Сонця» на меридіані даного місця називається середнім сонячним часом або середнім часом.

Підраховано, що 24 год зоряного часу рівні приблизно 23 год 56 хв 4,091 сек середнього часу.

Середня сонячна час за гринвіцьким меридіаном називається всесвітнім часом UT (Universal Time). Цей час містить рік, місяць, число, годину, хвилину і секунду. Перші три величини відраховуються за загальноприйнятим

(григоріанським) календарем, інші - за місцевим середнього часу на Грінвічському меридіані. Ця система відліку введена в 1928 р. III Генеральної асамблеї Міжнародного астрономічного союзу. Всесвітній час вимірюється годинним кутом "середнього Сонця", збільшеним на 12 годин, щодо Грінвіцького меридіана.

Так як рух полюсів Землі спричиняє зміну положення меридіанів, то за ступенем обліку збурюючих факторів розрізняють наступні системи всесвітнього часу:

UT0 - всесвітній час, що отримується в результаті поточних астрономічних вимірювань відносно не уточненого поправками Грінвіцького меридіана;

UT1 - всесвітній час Грінвіцького меридіана, розрахований з урахуванням руху полюсів. Воно є основою для вимірювання часу в повсякденному житті;

UT2 - відрізняється від UT1 сезонними виправленнями;

UT1R - відрізняється від UT2 виправленнями на припливи.

Через нерівномірність добового обертання Землі зоряні і сонячні добу незначно змінюються. Для точних розрахунків введено рівномірно поточний час - ефемерідное (передвчисленням) час ET, де одиниця міри часу (ефемерідная секунда), розраховується як  $1 / 86\,400$  частка середньої тривалості часу 1 січня 1900

Система ефемерідного часу утворена з UT шляхом введення поправки, отриманої за результатами спостереження Місяця.

Починаючи з 1986 року в якості аргументу в багатьох таблицях Астрономічного щорічника використовується земне динамічний час TDT. Система часу TDT заснована на теорії руху Сонця, Місяця і планет Сонячної системи. Динамічне час використовується при визначенні ефемерід супутників. Створення сверхстабільних атомних еталонів частоти (часу) дозволило перейти до неастрономіческому способу вимірювання часу і ввести штучну одиницю міри часу, що не залежить від особливостей обертання Землі - атомну секунду, близьку до ефемерідной. Атомна секунда прийнята як одиниці виміру часу XIII

Генеральною конференцією з мір і ваг в 1967 р. Атомна секунда дорівнює інтервалу часу, протягом якого відбувається 9 192 631 770 коливань, що відповідає резонансній частоті енергетичного переходу між рівнями надтонкою структури основного стану атома цезію-133 при відсутності зовнішніх впливів. Атомна секунда є основою шкали атомного часу АТ і прийнята в цей час за одиницю часу в системі СІ (замість ефемеридної секунди). Осереднені свідчень різних атомних еталонів часу дозволило Міжнародному бюро часу ВІН (Bureau International de l'Heure) створити шкалу міжнародного атомного часу ТАІ.

Для того, щоб система АТ несуттєво відрізнялася від системи UT1, яка використовується у повсякденному житті, шкала АТ періодично коригуються так, щоб різниця між показаннями годин, що відносяться до цих систем, не перевищувала 0,9 сек. Скоригований таким чином система атомного часу називається всесвітнім координованим часом UTC. Сигнали UTC передаються по радіомовних мереж. Різниця ТАІ-UTC становила 25 с на 1 січня 1990 р. Переваги UTC - порівняно висока рівномірність шкали, притаманна атомного часу, прив'язка до природних процесів (схід, захід), характерним для сонячного часу.

Поясний час  $ZT$  містить рік, місяць і число, які відраховуються аналогічно всесвітнім часом UT. Годинники, хвилини і секунди - як місцевий середній час центрального географічного меридіана розглянутого часового поясу за формулою  $ZT = UTC + \Delta n$ , де  $\Delta n$  - номер часового поясу. Поясний час введено в більшості країн з 1884 р., в Росії - з 1919 р. При цьому поверхня Землі була поділена на 24 часових пояси, центральні меридіани яких відрізняються за довготі на  $15^\circ$  (1 година). Гідність поясного часу - зручність використання в повсякденному житті, так як не вимагає уточнення часу при відповідних переміщеннях уздовж паралелі.

Повне позначення заданих моментів часу за допомогою розглянутих систем відліку не завжди зручно і вимагає використання як мінімум чотирьох чисел - рік, місяць, число і годинник з десятковими частками, тому на практиці



застосовують систему відліку, яка називається юліанським періодом, зручність якої полягає, зокрема, в тому, що рахунок поточного часу ведеться в днях (середніх сонячних добі з десятковими долями). Всі дні в цьому періоді пронумеровані по порядку незалежно від прийнятої календарної системи, номери року, місяця і т. д.

Рахунок днів, званих юліанським днями JD (Julian Date), ведеться від полудня 1 січня 4713 до н. е.. (початок юліанського періоду) до заданого моменту часу. Загальна тривалість юліанського періоду складає 7 980 років. Юліанському століттю містить 36 525 середніх сонячних діб.

Будь-який момент часу в цій системі відліку виражається числом, в якому ціла частина - число Юліанських днів, що пройшли до останнього середнього за Гринвічем полудня, а дрібна частина - інтервал часу в частках середніх сонячних діб, що пройшли від цього полудня до розглянутого моменту часу. Наприклад, в юліанському періоді момент московського часу 9 год 48 хв 1 січня 1985 позначається числом: 2 446 066, 783 333 JD.

Оновлена юліанський дата MJD (Modified Julian Date) отримана вирахуванням з JD 2 400 000,5 діб. У результаті цього в MJD міститься менше цифр, а рахунок починається опівночі, а не опівдні.

Перерахунок дати загальноприйнятого календаря в юліанському дату виробляють по довідкових таблиць або розрахункових формулах.

СРНС GPS і ГЛОНАСС функціонують у власних системах часу, заснованих на атомному часу. Початок відліку тимчасової шкали прив'язується до моменту ініціалізації системи.

Наприклад, відлік часу системи GPS (час GPS - GPST) починається з 0 годин 6 січня 1980 і на 19 з менше часу TAI. Для системи GPS є наступні спеціальні одиниці:

GPS-тиждень - кількість тижнів, що пройшов з моменту ініціалізації системи; відлік GPS-тижня починається від півночі з суботи на неділю;

GPS-день - номер дня в межах GPS-тижні, відлічуваний від 0 до 6;

GPS-секунда - кількість секунд в межах GPS-тижня.

### 3. ЗАГАЛЬНОЗЕМНІ СИСТЕМИ КООРДИНАТ

#### План лекції № 4

1. WGS-84.
2. Система геодезичних параметрів Землі ПЗ-90.
3. ITRS і ETRS.
4. Параметри переходу між деякими системами координат.

У СРНС GPS і ГЛОНАСС використовуються різні загальноземні геоцентричні системи координат, визначені незалежно один від одного. GPS функціонує в системі координат WGS-84 (World Geodetic System, 1984), ГЛОНАСС - в системі координат ПЗ-90 (Параметри Землі, 1990). Розбіжність координат в двох системах за різними оцінками становить від 5 до 15 м. У геоцентричній системі координат формується інформація про рух супутників, яка передається в навігаційному повідомленні користувачам. У цій же системі координат в супутниковому приймачі розраховуються координати користувача. Крім WGS-84 і ПЗ-90 існує найбільш точна на сьогоднішній день загальноземна геоцентрична система координат, яка називається ITRF.

Розглянемо зазначені системи координат більш докладно.

#### 3.1. WGS-84

Світова геодезична система - систем координат 1984 року (WGS-84) являє собою загальноземну систему, отриману шляхом уточнення доплеровської опорної системи NSWС 9Z-2 за результатами доплеровських вимірювань супутникової радіонавігаційної системи ВМС США ТРАНЗИТ.

Початок і осі WGS-84 визначаються наступним чином:

- початок координат - центр мас Землі;
- вісь  $Z$  - направлена на Міжнародне умовне початок СЮ, як це встановлено Міжнародним бюро часу ВІН;
- вісь  $X$  - перетин площині початкового меридіана WGS-84 і площини екватора, при цьому як вихідний меридіана приймається нульовий меридіан, визначений ВІН;

- вісь  $Y$  - доповнює правостороннім ортогональну систему координат з початком у центрі Землі і прив'язану до Землі (ECEF); вона розташована в площині екватора під кутом  $90^\circ$  на схід від осі  $X$ .

WGS-84 являє собою прив'язану до Землі глобальну опорну систему, включаючи модель Землі, та визначається набором основних і допоміжних параметрів (табл. 1).

Основні параметри визначають форму земного еліпсоїда, його кутову швидкість і масу Землі, яка включена в еліпсоїд.

Допоміжні параметри детально визначають модель земного тяжіння (EGFM), ступінь і порядок якої рівні  $n = m = 180$ . Цю модель застосовується для розрахунків висот над геоїд в системі WGS-84, компонентів порушення тяжіння WGS-84 та середніх гравітаційних аномалій  $1^\circ \times 1^\circ$  WGS-84 шляхом розкладання на сферичні гармонічні функції. Розкладання такої міри і порядку необхідні для точного моделювання змін гравітаційного поля Землі на її поверхні і поблизу її.

Таблиця 1

Параметри	Позначення	Значення
Велика піввісь	$a$	6378137 м
Полярний стиск	$1/f$	1/298,257223563
Кутова швидкість	$\omega$	$7,292115 \times 10^{-5}$ рад/с <sup>-1</sup>
Геоцентрична гравітаційна стала (з урахуванням маси атмосфери Землі)	$GM (fm)$	$398600,5 \text{ км}^3/\text{с}^{-2}$
Другий гармонійний коефіцієнт	$C_{20}$	$-484,16685 \times 10^{-6}$

Початок координат і орієнтація осей системи WGS-84 визначаються координатами п'яти контрольних станцій системи GPS: Колорадо-Спрінгс, Гаваї, Асансьон, Дієго Гарсія і Кваджалейн.

Точність ( $1 \sigma$ ) координат WGS-84, виражена через геодезичні широту  $\varphi$ , довгота  $\lambda$  і висоту  $h$ , дорівнює:

в горизонтальній площині  $\sigma_\varphi = \sigma_\lambda = \pm 1$  м;

у вертикальній площині  $\sigma_h \pm 1 \dots 2$  м.

Система WGS-84 двічі уточнювалася за результатами супутникових вимірів GPS (у 1994 і 1996 роках). Нові реалізації WGS-84 отримали

позначення WGS-84 (G730) і WGS-84 (G873), де G вказує, що координати були отримані GPS-методом, число після G вказує номер GPS-тижня. У СРНС GPS уточнені реалізації WGS-84 використовуються з 29 червня 1994 року і 29 січня 1997 відповідно.

### 3.2. СИСТЕМА ГЕОДЕЗИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЗЕМЛІ ПЗ-90

Геодезичні параметри Землі 1990 р. (ПЗ-90) включають фундаментальні астрономічні та геодезичні постійні, єдину геоцентричну систему координат (ЕСК), моделі гравітаційного поля Землі у вигляді коефіцієнтів розкладу геопотенціала в ряд по сферичним функцій і систем точкових мас, каталоги висот квазігеоїда над общеземним еліпсоїдом, параметри зв'язку ЕСК з національною референцної системою координат 1942 р. (СК-42).

Система ПЗ-90 отримана за результатами спостережень геодезичних супутників Гео-ІК (доплеровських, далекомірних радіотехнічних та лазерних), вимірювань висот супутників над поверхнею моря і фотографування супутників на тлі зоряного неба. Також використовувалися радіотехнічні та лазерні вимірювання дальностей до супутників систем ГЛОНАСС і ЕТАЛОН, гравіметричні дані на суші і Світовому океані.

Система ПЗ-90 має такі основні параметри:

Таблиця 2

Параметри	Позначення	Значення
Велика піввісь	$a$	6378136 м
Полярний стиск	$1/f$	1/298,257839303
Кутова швидкість	$\omega$	$7,292115 \times 10^{-5}$ рад/с <sup>-1</sup>
Швидкість світла	$c$	299792458 м/с
Геоцентрична гравітаційна стала (з урахуванням маси атмосфери Землі)	$GM (fm)$	$398600,44 \times 10^9$ м <sup>3</sup> /с <sup>-2</sup>
Нормальний потенціал	$U_0$	$62636861,074$ м <sup>2</sup> /с <sup>2</sup>
Другий гармонійний коефіцієнт	$C_{20}$	$-484164,953 \times 10^{-9}$

За визначенням система координат ПЗ-90 є геоцентричної прямокутної просторової системою з початком у центрі мас Землі, вісь Z спрямована до СЮ, як визначено рекомендаціями IERS, вісь X - в точку перетину площини екватора і нульового меридіана, встановленого ВІН, вісь Y - доповнює систему

до правої. Система координат ПЗ-90 закріплена на поверхні Землі координатами 33 пунктів Супутникової геодезичної мережі (СМР).

Середньоквадратичне помилки віднесення ПЗ-90 до центру мас Землі становлять 1-2 м, взаємне положення пунктів оцінюється близько 0,3 м при середніх відстанях між пунктами 1,5-2 тис. км (у відносній мірі - близько одиниці 7-го знака).

### **3.3. ITRS і ETRS**

Міжнародна Служба Обертання Землі IERS (International Earth Rotation Service) була організована спільно Міжнародний астрономічний союз IAU (International Astronomical Union) і Міжнародним Союзом Геодезії і Геофізики IUGG (International Union of Geodesy and Geophysics). Головним завданням IERS, як визначено в рішенні № 2 IUGG, прийнятому у Відні в 1991, є забезпечення параметрами орієнтації Землі (ЕОР) і реалізація міжнародних референсних астрономічних і земних систем координат.

Службою IERS за допомогою сучасних високоточних вимірювальних технологій (VLBI, LLR, SLR і GPS) з високою точністю встановлені системи геодезичних параметрів Землі. Є дві системи опорних мереж IERS:

- земна - ITRS (International Terrestrial Reference System);
- небесна - ICRS (International Celestial Reference System).

Реалізація ITRS на певну епоху називається ITRF (International Terrestrial Reference Frame).

Система ITRF закріплює в тілі Землі геоцентричну гринвіцьку систему координат. Її початок встановлено з точністю 10 см в центрі мас Землі, вісь Z з точністю  $+0,03''$  орієнтована по СІО, вісь X з точністю  $0,003''$  поєднана з площиною гринвіцького меридіана. Координати ITRF змінюються зі швидкістю 1-2 см на рік. Їх щороку уточнюють і складають каталоги на відповідні епохи - від ITRF88 до ITRF2000.

У системі ICRS за допомогою теорії прецесії 1976 р. і теорії нутації 1980 полярна вісь Землі приводиться до становища на епоху J 2000.

У 1987 році Міжнародна геодезична асоціація IAG (International Association of Geodesy) створила підкомісію EUREF для встановлення європейської системи параметрів Землі ETRS (European Terrestrial Reference Frame). На Симпозіумі EUREF в Анкарі, що проходив 22-25 травня 1996 року, були встановлені класи точності положень станцій мережі EUREF. До класу А віднесені ті станції, середньоквадратичне помилка у кожній з трьох координат у системі ETRS89 на епохи 1989-1999 рр.. не перевищує 1 см. Клас В характеризується тією ж точністю, але при віднесенні координат до епохи спостережень. Станції класу С повинні мати середньоквадратичне помилку положення не більше 5 см при умовах, що виконуються для класу А.

Пункти ITRS і ETRS входять до складу мережі Міжнародної GPS-служби IGS (International GPS Service).

### 3.4. ПАРАМЕТРИ ПЕРЕХОДУ МІЖ ДЕЯКИ СИСТЕМИ КООРДИНАТ

Параметри переходу між деякими системами координат наведено в табл.3.

Таблиця 3

СК	$\Delta X$ , м	$\Delta Y$ , м	$\Delta Z$ , м	$m$	$\omega X$ , 0,001"	$\omega Y$ , 0,001"	$\omega Z$ , 0,001"
ПЗ-90 – WGS-84	0	0	+1	0	0	0	-200,0
ITRF90 – WGS-84	0,060	-0,517	-0,223	-0,011	18,3	-0,3	7,0
ITRF97 – ITRF93	0,006	-0,005	-0,015	0,0004	-0,39	0,8	-0,96
СК-42 – ПЗ-90	+25,0	+141,0	+80,0	0	0	-350,0	-660,0

Наведені в таблиці параметри переходу між ПЗ-90 та WGS-84 визначені в 1996 році і не є остаточними і загальновизнаними. В даний час ведуться роботи по їх уточненню (в рамках проекту IGEX з вивчення спільного використання GPS і ГЛОНАСС).

Реалізації WGS-84 (G730) WGS-84 (G873) збігаються з ITRF на рівні точності 10 см. Для цих реалізацій немає ніяких офіційних параметрів перетворення. Можна вважати, що координати ITRF також виражені у WGS-84 на 10-ти см рівні точності.

## **4. СТРУКТУРА СРНС**

### **План лекції № 5**

1. Підсистема космічних апаратів.
2. Підсистема наземного контролю і управління.
3. Підсистема апаратури користувачів.

Проектування сучасних СРНС виконувалося з урахуванням наступних вимог:

- доступність (готовність) системи, мірою якої є ймовірність працездатності системи для виконання того чи іншого завдання;
- цілісність системи, мірою якої є ймовірність відмови системи за певний період часу;
- безперервність обслуговування, мірою якої є ймовірність працездатності системи протягом виконання того чи іншого завдання.

Для виконання цих вимог у складі сучасних СРНС GPS і ГЛОНАСС функціонують три основні підсистеми (сегменти):

- космічних апаратів (ПКА),
- наземного контролю і керування (ПНКУ),
- апаратури користувачів (ПАП).

За допомогою цих сегментів виконується визначення просторових координат місця розташування і часу користувача. Обчислення навігаційних параметрів виконується безпосередньо в приймачі користувача на основі беззапитних (пасивних) далекомірних вимірювань за сигналами декількох навігаційних ШСЗ з відомими координатами.

СРНС GPS і ГЛОНАСС за своєю структурою, принципами роботи та характеристиками аналогічні один одному і можуть використовуватися спільно.

### **4.1. ПІДСИСТЕМА КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ**

ПКА складається з певного числа («сузір'я») навігаційних супутників. Основна функція ПКА - формування і випромінювання радіосигналів, необхідних для визначення місця розташування користувачів. Для цього на кожному супутнику встановлено наступне обладнання: апаратура для прийому та

передачі радіосигналів, бортовий комп'ютер, бортовий високоточний атомний еталон частоти і часу, сонячні батареї живлення, двигуни коректування орбіт. Бортові еталони часу і частоти забезпечують практично синхронне випромінювання навігаційних сигналів усіма супутниками, що є обов'язковою умовою для реалізації беззапитних вимірювань в приймальниках користувачів.

Вибір складу та конфігурації орбітального угруповання навігаційних супутників забезпечує задану робочу зону (одночасне спостереження в будь-якій точці Землі), можливість реалізації різних методів вимірювань, безперервність і точність координатних визначень.

ПКА GPS складається з 24-х супутників (з них 3 резервних), розташованих по чотири в шести орбітальних площинах, розгорнутих через  $60^\circ$ . Нахил площин до екватора дорівнює  $55^\circ$ . Орбіти практично кругові. Середня висота супутників 20145 км, період обертання приблизно 11 год 57 хв, швидкість переміщення вздовж орбіти близько 3,9 км/с. Середній термін служби супутників - 10 років.

Для передачі навігаційних сигналів (далекомірних кодів, міток часу, даних про координати супутника, ідентифікаційних ознак та ін) на кожному супутник є генератор основних коливань з опорною частотою 1,023 МГц (C/A-код) і 10,23 МГц (P-,Y-код). Ці коливання випромінюють на несучих частотах  $f_1 = 1575,42$  МГц ( $L_1$ ) з довжиною хвилі 19,0 см і  $f_2 = 1227,60$  МГц ( $L_2$ ) з довжиною хвилі 24,4 см. Частота  $L_1$  модулювати двома далекомірними кодами: точним (Precision) P-кодом і легкодоступним (Clear Acquisition) C/A-кодом. Частота  $L_2$  модулювати одним P-кодом. P-код, на відміну від C/A -код, призначений для санкціонованих (в основному, військових) користувачів GPS.

Усі супутники GPS використовують ті самі частоти, але кожний супутник має свій код. У будь-який час, без попереднього повідомлення, може бути введений так званий режим виборчого (селективного) доступу SA (Selective Availability), при якому навмисно з метою зниження точності вимірювань спотворюють далекомірний код і ефемериди супутників. З цією ж метою передбачено режим додаткового шифрування AS (Anti-Spoofing), коли P-код переводиться в новий, Y-код.

Супутники по своїй модифікації і функціональними можливостями



об'єднані в групи - блоки I, II і III R. В даний час на орбіті функціонують супутники блоків II і III R. Проектується запуск супутників нового покоління - блок II F - зі збільшеним терміном служби, в яких планується ввести другу «громадянську» частоту  $L_5$ .

ПКА ГЛОНАСС складається з 24-х супутників (з них 3 резервних), розташованих по вісім супутників в трьох орбітальних площинах, розгорнутих через  $120^\circ$ . Нахил площин орбіт до екватора дорівнює  $64,8^\circ$ . Середня висота супутників 19100 км, період обертання приблизно 11 год 16 хв. Оснащення супутників таке ж, як і в GPS. Крім того, супутники ГЛОНАСС додатково обладнані відбивачами, а наземні станції спостереження - лазерними далекомірами.

У ГЛОНАСС використовується основна частота 0,511 МГц. Частоти  $L_1$  і  $L_2$  мають індивідуальні значення для кожного супутника (у діапазоні 1602,56 ... 1615,5 - для  $L_1$ , 1246,44 ... 1256,5 - для  $L_2$ ). Вони знаходяться в точному співвідношенні 9/7, довжини хвиль близькі до 18,7 і 24,1 см. У ГЛОНАСС всі супутники мають однакові коди: високої (ВТ) і стандартної (СТ) точності, без штучного зниження точності.

## **4.2. ПІДСИСТЕМА НАЗЕМНОГО КОНТРОЛЮ ТА УПРАВЛІННЯ**

ПНКУ складається з станцій спостереження за супутниками, служби точного часу, головної станції (Колорадо-Спрінгс, США) з обчислювальним центром і декількох станцій завантаження інформації на супутники, що працюють в автоматичному режимі. Основним завданням ПНКУ є моніторинг цілісності СРНС: спостереження і контроль за траєкторіями супутників, збір необхідної інформації для визначення та прогнозування координат супутників (ефемерид), контроль за роботою апаратури супутників, управління режимами її роботи і параметрами супутникових сигналів, формування часу системи та його синхронізація щодо Всесвітнього часу, завантаження даних в пам'ять кожного супутника.

Навігаційні супутники періодично пролітають над станціями стеження, що дозволяє визначати і прогнозувати їх ефемериди, формувати необхідну службову інформацію і завантажувати її в бортовий комп'ютер.

Синхронізація різних процесів у СРНС забезпечується за допомогою високостабільного (атомного) еталона часу і частоти, який використовується в процесі юстування бортових еталонів навігаційних супутників.

#### **4.3. ПІДСИСТЕМА АПАРАТУРИ КОРИСТУВАЧІВ**

Користувачі СРНС діляться на дві категорії: військові та цивільні. У складі GPS діють Служба точного позиціювання PPS (Precise Positioning Service) і Служба стандартного позиціювання SPS (Standard Positioning Service). PPS базується на використанні Р-коду та двох несучих частот, SPS - на використанні С/А-коду та однієї несучої частоти.

Дозволена точність абсолютного визначення місця розташування для цивільних користувачів GPS - приблизно 100 м (при включеному режимі SA), а для військових - приблизно 30 см, що досягається за рахунок використання Р-коду. Цивільні користувачі поділяються на дві основні групи по області застосування СРНС - навігаційне використання і геодезичне використання. ПАК складається з апаратно-програмних засобів, призначених для прийому та обробки супутникових радіосигналів з метою визначення просторових координат та іншої необхідної користувачам інформації (часу, напрямку і швидкості, просторової орієнтації та ін.).

Просторові координати в приймачі користувача звичайно визначаються в два етапи: спочатку визначаються поточні координати супутників і первинні навігаційні параметри (дальність, її похідні та ін) щодо відповідних супутників, а потім розраховуються вторинні - геодезичні координати місця розташування користувача.

Стандартний комплект ПАК для геодезичного застосування складається із двох (або більш) приймачів супутникових сигналів з комплектом додаткового встаткування і програмного забезпечення для обробки супутникових вимірів.

GPS-приймачі залежно від типу виконуваних вимірів і доступності коду діляться на три групи:

- Кодові —, що вимірюють псевдодальности на основі С/А-коду;

- Фазові —, що вимірюють фазу прийнятого сигналу з використанням С/А-коду;

- Р-кодіві —, що вимірюють фазу прийнятого сигналу з використанням Р-коду. Використання Р-коду досягається за рахунок установки спеціальної плати на вході приймача.

Залежно від кількості використовуваних частот приймачі бувають одночастотні та двочастотні.

По способах спостереження за супутниками приймачі класифікуються на одне- і багатоканальні. Захват і відстеження супутників у багатоканальних приймачах виконується незалежними прийомними каналами. У цей час найпоширеніший 9, 12-ти канальні приймачі, у яких прийомний канал може працювати з будь-яким супутником ( так званий метод All in View). Є також 24-х канальні приймачі, у яких кожному супутнику зіставлений певний канал.

Апаратура користувачів ГЛОНАСС аналогічна апаратурі користувачів GPS.

У світі є більш 50 фірм-виробників супутникових приймачів. Найбільш відомі серед них – Trimble (США), Ashtech (США), Leica (Швейцарія), Zeiss (Німеччина), Geotronics (Швеція). Але виробництвом системних плат для приймачів займаються тільки перші дві.

У цей час велика увага приділяється питанням спільного використання обох СРНС. Основною перевагою спільного використання є значне збільшення кількості спостережуваних супутників, що дозволить виконувати виміру в зонах обмеженої видимості супутників, підвищити точність вимірів, їх надійність і вірогідність, а також скоротити тривалість сеансів вимірів. Такі приймачі, що працюють одночасно у двох системах, уже пропонуються споживачам декількома фірмами. Наприклад, фірма Ashtech пропонує 24-канальний приймач GG-24, по 12 каналів на GPS і ГЛОНАСС. Фірма Spectra Precision – одночастотний приймач Geotracer GPS+GLONASS на базі системної плати Ashtech.



Положення орбітальної площини щодо екваторіальній характеризується двома орбітальними елементами - довготою висхідного кута  $\Omega$  і нахилом орбіти  $i$ . Кут  $\Omega$  відраховується в екваторіальній площині від напрямку на точку весняного рівнодення (вісь  $OX$ ) до лінії вузлів і змінюється в діапазоні від 0 до 360 °. Кут  $i$  визначається як кут між екваторіальній і орбітальної площинами і змінюється в діапазоні від 0 до 180 °: -

при  $i = 0^\circ$  - екваторіальна орбіта,

- при  $0 < i < 90^\circ$  - похила,

- при  $i = 90^\circ$  полярна.

Орієнтація орбіти в орбітальної площині характеризується кутом перигею (аргументом перицентра)  $\omega$  між напрямком на висхідний вузол  $U$  і перигею  $P$ , відраховувати від  $U$  у напрямку руху ШСЗ.

Розміри орбіти задаються великої півосі  $a$  і ексцентриситетом  $e$ .

Кутове видалення  $v$  супутника від перигею  $P$  в орбітальної площині, відлічуваний за напрямком руху ШСЗ, називається справжньою аномалією (тобто це кут між радіус-вектором супутника і напрямом на перигей). Вона характеризує положення супутника на орбіті. Зазвичай замість справжньої аномалії в якості шостого елемента орбіти використовується момент проходження супутника через перигей  $\tau$ , а також ексцентричної аномалію  $E$  і середню аномалію  $M$ .

Кеплерови елементи орбіти змінюються в часі і повинні бути відомі на момент позиціонування.

## 5.2. ОБЧИСЛЕННЯ КООРДИНАТ СУПУТНИКА

Для еліптичної орбіти використовується наступний алгоритм обчислень координат супутника на момент часу (добу)  $t$ :

1. Обчислення середньої аномалії  $M$  за формулами

$$M = \omega_c (t - \tau), \quad \omega_c = \frac{2\pi}{T}, \quad T = \frac{2\pi a^{3/2}}{\sqrt{fM_3}} \quad (18)$$

де  $\omega$  с - кутова швидкість обертання супутника на орбіті,  $T$  - період обертання,  $\tau$  - час проходження через перигей,  $fM_3$  - геоцентрична гравітаційна стала Землі.

2. Обчислення ексцентричної аномалії  $E$  послідовних ітерацій за формулою

$$E - e \sin E = M \quad (19)$$

3. Визначення радіус-вектора  $R$  супутника за формулою:

$$R = a(1 - e \cos E) \quad (20)$$

4. Обчислення справжньої аномалії  $v$  і аргументу широти  $u$  за формулами

$$\operatorname{tg} \frac{v}{2} = \left( \frac{1+e}{1-e} \right)^{1/2} \operatorname{tg} \frac{E}{2} \quad (21)$$

$$u = v + \omega \quad (22)$$

5. Визначення прямокутних геоцентричних координат супутника за формулою

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = R \begin{pmatrix} \cos(u) \cos(\Omega) - \sin(u) \cos(i) \sin(\Omega) \\ \cos(u) \sin(\Omega) + \sin(u) \cos(i) \cos(\Omega) \\ \sin(u) \sin(i) \end{pmatrix} \quad (23)$$

Алгоритм і формули спрощуються для кругових орбіт, ексцентриситет яких  $e$  дорівнює 0.

### 5.3. ІНФОРМАЦІЯ ПРО РУХ СУПУТНИКА

Як уже зазначалося, просторові координати місця розташування приймача визначаються через координати супутників. Інформація про положення супутника на орбіті передається у складі навігаційного повідомлення. Навігаційне повідомлення призначене для планування і проведення сеансів супутникових вимірів. Воно вбудовується в передані кожним супутником радіосигналів.

Навігаційне повідомлення, яке містить оперативну і неоперативну навігаційну інформацію.

Оперативна інформація відноситься до того супутника, з якого передається даний навігаційний радіосигнал, і складається з наступних даних:

- ефемериди супутника - прогнозовані координати і параметри руху супутника на фіксований момент часу;
- зсув шкали часу супутника щодо шкали часу СРНС;
- відносне відміну несучої частоти випромінюваного радіосигналу від номінального значення;
- код мітки часу для синхронізації процесу вилучення навігаційної інформації в приймачі користувача.

Ефемериди містять такі основні дані: «вік» ефемеридних даних, початкову епоху ефемерид, шість параметрів орбіти на початкову епоху, швидкість зміни кута нахилу орбіти і зміни прямого сходження вузла, різні поправочні коефіцієнти.

Неоперативна інформація містить альманах системи. Альманах - набір наближених супутникових даних, що використовується для обчислення приблизного місця розташування супутника, часу появи його над горизонтом, піднесення і азимута. Альманах використовується приймачем для захоплення супутників, а також у процесі планування сеансів спостережень. Альманах містить наступні основні дані: дані про стан всіх супутників системи (альманах стану), зсув шкали часу кожного супутника щодо шкали часу системи (альманах фаз), наближені параметри орбіт всіх супутників системи (альманах орбіт) та інші.

Застосування СРНС істотно залежить від знання орбіт супутників.

Наприклад, при абсолютному позиціонування помилка в значній мірі залежить від помилки визначення орбіти. Помилки ефемерід - це різниця між дійсним станом супутника і положенням, прогнозоване на основі переданих супутником ефемерід. Застосування режиму SA в GPS в числі інших зводиться до штучного огрублення саме ефемерід.

Ефемериди (в GPS - широкомовні ефемериди, Broadcast ephemeris) формуються (обчислюються) за результатами спостережень за супутниками станціями стеження підсистеми наземного контролю і управління та завантажуються двічі на добу в пам'ять бортових комп'ютерів супутників. Таким чином, що передаються супутниками ефемериди, є екстраполяцією найбільш свіжі дані про орбітах. Їх точність становить приблизно 50 м.

На відміну від широкомовних, точні ефемериди є результатом постобробки вимірювань, виконаних з багатьох станцій спостереження. Вони представляють собою набір координат супутників і їх швидкостей через рівні проміжки часу. В даний час точні ефемериди поширюються декількома науковими організаціями та спеціалізованими службами через мережу Інтернет в спеціальному форматі SP3, і вони стають доступними через кілька тижнів після завершення збору даних. Наприклад, Міжнародна GPS-служба IGS поширює точні ефемериди супутників GPS трьох типів:

- попередні (predicted) - практично відразу ж, точність 50 см;
- швидкі (rapid) - через 1-2 дні, точність 10 см;
- остаточні (final) - через 10-12 днів, точність 5 см.

Приклад назви файлу точних ефемерід - IGS10403.SP3, де S означає остаточне рішення (P - попередні, R - швидкі), 1040 - номер GPS-тижні, 3 - номер дня в GPS-тижні.

Точні ефемериди використовуються в геодезичних роботах, що вимагають найвищої точності, а також при обчисленні векторів довжиною понад 20 км.



## 6. ОСНОВИ ТЕОРІЇ СУПУТНИКОВИХ ВИМІРЮВАНЬ (ПОЗИЦІОНУВАННЯ)

### План лекції № 7

1. Загальний принцип позиціювання.
2. Фізичні основи позиціювання.

### 6.1. ЗАГАЛЬНИЙ ПРИНЦИП ПОЗИЦІОНУВАННЯ

Координати користувача в СРНС визначаються методом зворотної просторової лінійної зарубки, де вимірюються спотворені похибками дальності від приймача до супутника. При цьому супутники виконують функцію наземних геодезичних пунктів з відомими координатами.

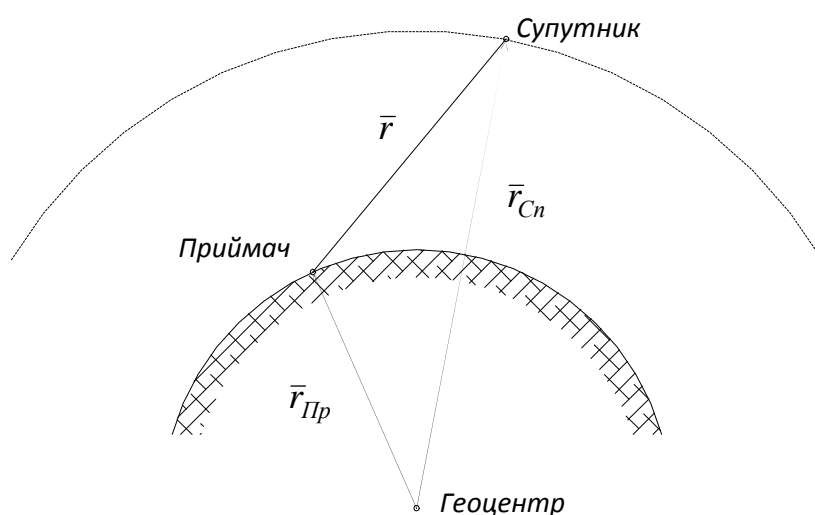


Рис. 6

Припустимо, в певний момент часу супутник як би завмер в просторі (рис. 6). Просторові координати кожного супутника щодо центру мас Землі можна обчислити, знаючи ефемериди, передані супутником. Якщо в приймачі, місце розташування (тобто геоцентричних вектор місця розташування  $\bar{r}_{Pr}$ ) якого необхідно визначити, використовуються годинник, абсолютно точно встановлені за часом СРНС, то, реєструючи час, необхідний для проходження кодового

сигналу від супутника до приймача, можна визначити істинні відстані (або дальності  $\bar{r}$ ) до кожного супутника. У геометричному сенсі кожна дальність дає для визначення місця розташування приймача сферу, центр якої співпадає з супутником. Отже, використовуючи цей метод, необхідно виміряти дальності лише до трьох супутників, оскільки перетин трьох сфер дозволяє отримати три невідомих координати (наприклад,  $X$ ,  $Y$  і  $Z$ ). Рішення може бути отримано з трьох рівнянь дальності для кожного супутника:

$$\bar{r} = \left\| \bar{r}_{Cn} - \bar{r}_{Pr} \right\| \quad (24)$$

Обладнання приймачів годинником, що забезпечують необхідну високу точність синхронізації часу (10-12 с), призвело б до істотного подорожчання їх вартості, збільшення габаритів і ускладнення організації робіт з ними. Тому в сучасних приймачах використовується інший метод: у них встановлюються недорогі кварцові годинники, які лише наближено встановлюються за часом СРНС.

Через різницю часу приймача і супутника відстань до супутника виходить менше або більше від дійсного. Цю проблема вирішується шляхом вимірювання чотирьох дальностей до чотирьох супутників одночасно. Такі відстані називають псевдовідстаней, оскільки вони рівні істинним дальностям, збільшеним або зменшеним на деяку відстань  $\Delta r$ , що виникає через помилку годин приймача.

Розташування пункту, як і раніше, можна визначити лінійної зарубкою, але тепер для знаходження чотирьох невідомих (трьох координат приймача і поправки годин) потрібно виміряти чотири псевдовідстаней. Величина  $\Delta r$  може бути виключена шляхом формування різниць псевдовідстаней, виміряних з одного пункту до двох супутників або з двох різних пунктів до одного супутника.

Конфігурація супутників СРНС була спроектована таким чином, щоб забезпечити користувачам радіовидимості як мінімум 4-х супутників в будь-якій точці в будь-який час для визначення свого місця розташування при нормальних умовах спостережень.

## 6.2. ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ПОЗИЦІОНУВАННЯ

Використання СРНС засноване на передачі вимірювальної інформації із супутника за допомогою електромагнітних хвиль. Електромагнітна хвиля являє собою поширення коливань у просторі.

Найпростішими є гармонійні (синусоїдальні) коливання, які описуються рівнянням

$$U = U_m \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (25)$$

де  $U$  - поточне значення коливання,  $U_m$  - максимальна амплітуда коливання,  $\omega$ -кругова (циклічна) частота,  $t$  - поточний час (тобто проміжок часу від деякого моменту часу  $t_0 = 0$ ),  $\varphi_0$  - початкова фаза коливання.

Проміжок часу  $T$ , протягом якого відбувається повне коливання, називається періодом коливання.

Величина  $f$ , зворотній періоду коливань, називається частотою коливання:

$$f = \frac{1}{T} \quad (26)$$

Частота дорівнює числу повних коливань, що здійснюються в одиницю часу, і вимірюється в герцах (1 Гц - 1 коливання в секунду).

Частота  $f$  пов'язана з круговою частотою  $\omega$  співвідношенням або

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \text{ або } \omega = 2\pi f \quad (27)$$

Замінивши у формулі (25) кругову частоту  $\omega$  частотою коливання  $f$ , отримаємо

$$U = U_m \sin(2\pi f t + \varphi_0) \quad (28)$$

Величину  $2\pi f \varphi_0$  називають миттєвої або поточної фазою коливання.

Якщо коливання поширюється уздовж деякої прямої, то в будь-якій її точці виникнуть коливання з тієї ж частотою, але з деяким запізненням  $\tau$ , що залежать від швидкості розповсюдження  $c$  і видалення даного пункту від джерела коливань  $d$ . Час запізнювання  $\tau$  буде так само часу, який витрачається коливанням для проходження відстані до цієї точки:

$$\tau = \frac{d}{c} \quad (29)$$

Таким чином, для будь-якої точки на прямій можна написати

$$U = U_m \sin(2\pi f(t - \tau) + \varphi_0) \quad (30)$$

або

$$U = U_m \sin(2\pi f(t - \frac{d}{c}) + \varphi_0) \quad (31)$$

Це вираз називається рівнянням плоскої хвилі гармонійного коливання.

За проміжок часу, що дорівнює одному періоду  $T$ , коливання поширяться на відстань  $\lambda = Tc$ , або

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (32)$$

Відстань  $\lambda$  називається довжиною хвилі, що відповідає частоті  $f$ .

## **7. МЕТОДИ ПОЗИЦІОНУВАННЯ**

### **План лекції № 8**

1. Автономний метод.
2. Диференціальний метод.
3. Методи супутникових вимірів.

### **7.1. МЕТОДИ ПОЗИЦІОНУВАННЯ**

Методи позиціонування діляться на дві групи:

- визначення абсолютних координат місця розташування з псевдовідстаней, отриманих за дальномірні кодами (C/A, P, ST, BT) - автономний та диференціальний методи;
- визначення приросту координат (або вектора) між пунктами, на яких встановлені приймачі, з псевдовідстаней, отриманих за вимірюваннями фаз несучої частоти сигналу супутників - відносний метод.

Автономне позиціонування - автономне в тому сенсі, що координати місця розташування приймача визначаються незалежно від вимірювань, що виконуються іншими приймачами. Даний метод чутливий до всіх джерел похибок: похибки в координатах супутників, вплив середовища розповсюдження і зовнішніх впливів, геометричний фактор. Як уже зазначалося, в GPS точність абсолютного позиціонування для цивільних користувачів становить приблизно 25-100 м по C/A-коду і приблизно 30 см - для військових користувачів по P-коду. При точних вимірах автономне позиціонування використовується для знаходження наближених координат.

Принцип диференціального позиціонування полягає в наступному. Вимірювання псевдовідстаней виконуються за дальномірні кодами одночасно на двох (або більше) пунктах: т. н. базової станції, розташованої на пункті з відомими координатами, і мобільної станції, розташованої на обумовленому пункті. На базової станції вимірювання псевдовідстаней порівнюються з вичисленими за координатами і визначаються їх різниці. Ці різниці

називаються диференціальними поправками.

Даний метод заснований на припущенні, що багато похибки однаково впливають на вимірювання, що виконуються на кожній станції. Справді, похибки вимірювань по C/A-коду і виникають через режим SA, на обох станціях практично одні й ті ж. Вплив атмосфери на різних лініях може дещо відрізнятися з причин різної довжини трас і локальних неоднорідностей на них. Однак експериментальними даними встановлено, що при відстані між пунктами менше 10 км, вплив атмосфери однаково для обох пунктів. Похибки в координатах супутників також виключаються, причому в значній мірі. При похибки координат супутників 10 м і відстані між пунктами 10 км різниця в перекручуваннях псевдовідстаней до базової та мобільного станцій складає 5 мм. Чим ближче розташовані станції, тим точніше виконується корекція.

Поправки передаються на мобільну станцію, коригуючи тим самим вимірювання, в реальному часі або враховуються під час обчислення координат після вимірювань. Передача і прийом поправок в спеціальному форматі RTCM в реальному часі виконується за допомогою спеціального обладнання - радіомодеми. Передані поправки швидко "старіють" і тому одночасно з поправками передають їх "вік" і дані про швидкість їх зміни. Точність диференціального позиціонування близько 1-5 м.

Відносний метод визначення координат місця розташування (відносне позиціонування) полягає в одночасному виконанні супутникових вимірів двома (і більше) приймачами.

У відносному методі через абсолютні координати пунктів, отримані з безпосередніх вимірювань, визначається приріст координат (просторовий вектор, baseline) між ними, яке буде вільно від помилок абсолютного позиціонування. Таким чином, коли один приймач встановлений на пункті з відомими координатами, а інший - на що визначається, то просторові координати другого пункту визначаються через обчислюване приріст координат. У випадку, коли обидва приймача встановлюються на пунктах з невідомими координатами,

визначається просто приріст координат, через яке можна обчислити відстань і перевищення між пунктами, азимут лінії.

Застосування відносного методу дозволяє визначити просторовий вектор (baseline) між пунктами з точністю  $5\text{мм} \times 1\text{мм} \times 10^{-6} D$ , де  $D$  - відстань між пунктами в мм.

## **7.2. МЕТОДИ СУПУТНИКОВИХ ВИМІРЮВАНЬ**

Для виконання супутникових вимірювань застосовуються такі методи:

- статичний (Static);
- швидкостатичний (Fast Static, Rapid Static);
- псевдокінематическій (псевдостатіческій, реокупація);
- кінематичний.

Статичний метод припускає, що вимірювання виконуються між двома (і більше) нерухомими приймачами тривалий період часу.

Швидкостатичний метод передбачає зменшення часу спостережень (до 5-10 хвилин) у статичному методі за рахунок оптимального використання всіх доступних якісних вимірів при двох частотах. Обов'язковою умовою є використання двочастотні приймачів.

Псевдокінематическій метод передбачає зменшення часу вимірювань у порівнянні зі статичним методом за рахунок спільного використання двох 5-10 хвилинних періодів спостережень, розділених годинниковим (і більше) інтервалом, з тим щоб змінилося взаємне розташування спостережуваних супутників.

Кінематичний метод передбачає виконання одночасних спостережень між нерухомим (референцної) і мобільним приймачами. Для виконання методу необхідно на першому пункті виконати так звану ініціалізацію (рішення неоднозначності) і при переміщенні мобільних приймачів між пунктами необхідно підтримувати постійний захоплення 4-5 супутників. При втраті захоплення повторюється процедура ініціалізації. Метод має два різновиди: так звані Stop & Go ( "Стій-Іди", "Зупинка-Переїзд") кінематика і кінематика в

режимі реального часу (Real-Time Kinematic - RTK).

Stop & Go кінематика передбачає фіксацію антени мобільного приймача на визначених пунктах для виконання вимірювань протягом близько 1 хвилини.

RTK аналогічна Stop & Go кінематиці за технологією виконання польових робіт, але різниться за технології обробки. RTK заснована на передачі поправок до вимірювання псевдовідстаней від референцної приймача до мобільного через пристрій зв'язку (радіомодем). При спільній обробці вимірювань референцної та мобільного приймачів визначаються координати пункту, на якому встановлено мобільний приймач. Результати, на відміну від інших методів, видаються негайно після виконання вимірювань.

Точність вимірювань сучасними геодезичними супутниковими приймачами залежить від типу приймача і вибраного методу вимірювань. Стандартні показники точності наведені в таблиці 4:

Точність визначення геодезичних висот, як правило, в 1,5 рази нижче точності визначення векторів.

Точність супутникових вимірів забезпечується за нормальних умов спостережень, які повинні відповідати таким вимогам:

- 1) Мінімальна кількість спостережуваних супутників - 4-5.
- 2) Значення DOP (Dilution Of Precision) не більше 4 (або інше паспортне значення) на всьому протязі вимірювань.
- 3) Відсутність невідновлювальних збоїв (перепусток циклів - Cycle Slip) під час прийому супутникових сигналів на всьому протязі вимірювань.
- 4) Мінімальний кут піднесення спостережуваних супутників над горизонтом - не менше 15°.
- 5) Відсутність перешкод, що перешкоджають прийому сигналу або спотворюють сигнал (багатоколіїних).
- 6) Нормальний атмосферний вплив.



Таблиця 4

Метод	Середня відстань між пунктами, км	Тривалість сеансу	Абс. і отн. похибка вимірювання відстані	Примітки
Статичний	до 20	близько 1 години	5мм + $1 \times 10^{-6}$ Дмм 1:100000 - 1:5000000	Для двочастотного приймача
Швидкостатичний	до 10	5-10 хв	5-10мм + $1 \times 10^{-6}$ Дмм 1:100000 - 1:1000000	Для двочастотного приймача
Псевдокінематичний	до 10	20 хв (2 рази по 10 хв)	10мм + $1 \times 10^{-6}$ Дмм 1:50000 - 1:500000	Переважно для одночастотного приймача
Stop & Go	до 5	до 2 хв	10-20мм + $1 \times 10^{-6}$ Дмм 1:100000 - 1:1000000	
RTK	5-10 (залежно від радіо-модеми)	до 1 хв	10-20мм	При наявності пристрою зв'язку (радіомодеми)

Використання під час вимірювань більшої кількості одночасно спостережуваних супутників збільшує обсяг вимірювань, що дозволяє підвищити достовірність та надійність визначення векторів.

Значення DOP враховує взаємне геометричне розташування супутників і місця встановлення антени на момент вимірів. Менше значення вказує на гарну геометрію і, отже, гарні умови вимірювань.

Пропуски циклів - втрати у вимірах цілих довжин хвиль фази несучої частоти при тимчасовій втраті захоплення супутників. Завдання обробки супутникових вимірів виявити пропуски і виправити їх. Велика кількість не виправлених пропусків може призвести до помилкового визначення векторів.

Сигнали із супутників, що знаходяться при кутах піднесення над горизонтом менше  $15^\circ$ , спотворюються впливом тропосфери.

Багатоколіїність впливає на фазові і кодові вимірювання і знижує точність визначення векторів.

Вибір схеми побудови мережі, наявність і конкретна реалізація методів залежить від типу та конструкції приймача, а також наявного програмного забезпечення для обробки вимірів.

## **8. ПОБУДОВА ГЕОДЕЗИЧНИХ МЕРЕЖ СУПУТНИКОВИМИ МЕТОДАМИ**

### **План лекції № 9**

1. Планова і висотна геодезична основа для розвитку геодезичних мереж.
2. Схеми побудови супутникових мереж.

### **8.1. ПЛАНОВА І ВИСОТНА ГЕОДЕЗИЧНА ОСНОВА ДЛЯ РОЗВИТКУ ГЕОДЕЗИЧНИХ МЕРЕЖ**

Застосування відносного методу для визначення координат дозволяє вимірювати вектори між пунктами в міліметровому діапазоні точності. Відповідно до цього ставляться вимоги до точності вихідної планово-висотної основи. Для розвитку ГСС і спеціальних мереж як вихідну основи використовуються пункти з середньою квадратичне похибкою взаємного положення не більше  $5 \text{ мм} + 2 \times 10^{-7} \text{ Дмм}$  для кожної планової координати і  $7 \text{ мм} + 3 \times 10^{-7} \text{ Дмм}$  для геодезичних висот. Цим вимогам задовольняє СГС-1, яка буде створена в майбутньому. До побудови СГС-1 допускається використовувати як вихідної основи пункти існуючої АГС.

На об'єктах площею до  $100 \text{ км}^2$  кількість пунктів вихідної планової мережі повинно бути не менше трьох. Вихідні пункти повинні бути рівномірно розподілені по межі об'єкта. Відстань між ними має бути не більше 60 км. Максимальне видалення від кордону об'єкта не повинна перевищувати 40 км. Додаткові (надлишкові) вихідні пункти можуть розташовуватися усередині об'єкта робіт. При більшій площі об'єкта число пунктів вихідної планової мережі пропорційно збільшується.

У мережах витягнутої форми вихідні пункти повинні розташовуватися на початку, середині і наприкінці мережі. Відстань між ними має бути не більше 60 км.

У результаті супутникових вимірів визначаються геодезичні висоти пунктів. Для переходу від геодезичних висот до нормальних необхідно знати

висоту квазігеоїда (геоїд) над еліпсоїдом, яка не є постійною величиною через хвилеподібно поверхні геоїд. Висоти геоїда над еліпсоїдом можна отримати безпосередньо на об'єкті робіт шляхом виконання супутникових вимірів на реперах існуючої висотної мережі (будь-якого класу) або спеціальної прив'язки пунктів створюваної мережі до неї.

На об'єктах площею до  $100 \text{ км}^2$  кількість реперів вихідної висотної мережі повинно бути не менше чотирьох, рівномірно розподілених по межі об'єкта і всередині об'єкта. При більшій площі об'єктів пропорційно збільшується кількість реперів вихідної висотної мережі.

У гірських районах, де дуже виражені варіації хвиль геоїд, кількість реперів вихідної висотної мережі має бути збільшено в 1,5-2 рази.

На об'єктах, які мають витягнуту форму, відстань між реперами вихідної висотної мережі повинно бути не більше 5 км, якщо ширина об'єкта не перевищує 5 км. При більшій ширині необхідно мати додаткові реperi нівелювання, розташовані по обидва боки об'єкта.

## **8.2. СХЕМИ ПОБУДОВИ СУПУТНИКОВИХ МЕРЕЖ**

При створенні і реконструкції геодезичних мереж із застосуванням супутникової технології геометрична форма мережі не впливає на точність визначення координат. У разі використання результатів супутникових вимірювань для визначення геометричних елементів (довжин ліній і кутів) у традиційних побудовах (тріангуляція, трілатерація, полігонометрія), необхідно дотримувати встановлені відповідними інструкціями вимоги до форми мережі. Зрівняльні обчислення в таких мережах виконуються за звичайними програмами, що застосовуються в традиційних геодезичних методах.

При використанні супутникової технології рекомендується дві основні схеми побудови мереж:

- замкнутих геометричних фігур (полігонів);
- радіальна.

Побудова у вигляді замкнутих геометричних фігур являє собою систему пунктів з визначенням векторів між ними таким чином, щоб вони утворили замкнуті геометричні фігури (полігони). Примірний форма мережі наведена на рис. 7.

Побудова у вигляді радіальних мереж являє собою систему пунктів з визначенням векторів між референцної приймачем і мобільним приймачем. Ці вектори вважаються «висячими». Примірний форма радіальної мережі наведена на рис. 8.

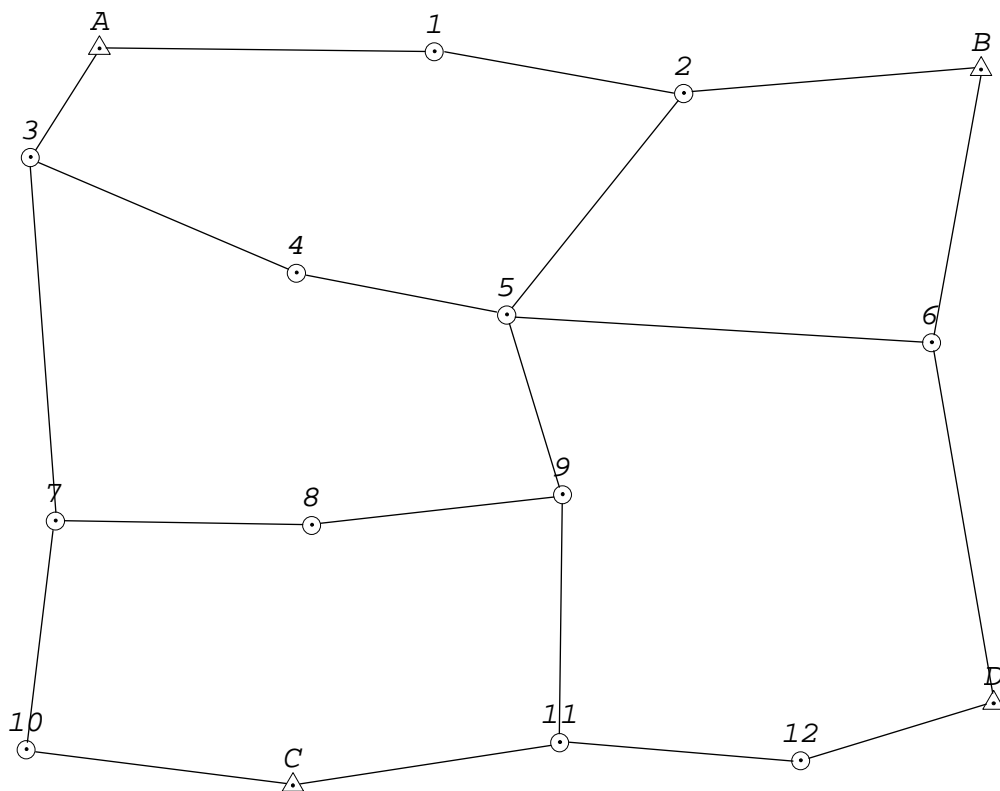


Рис. 7

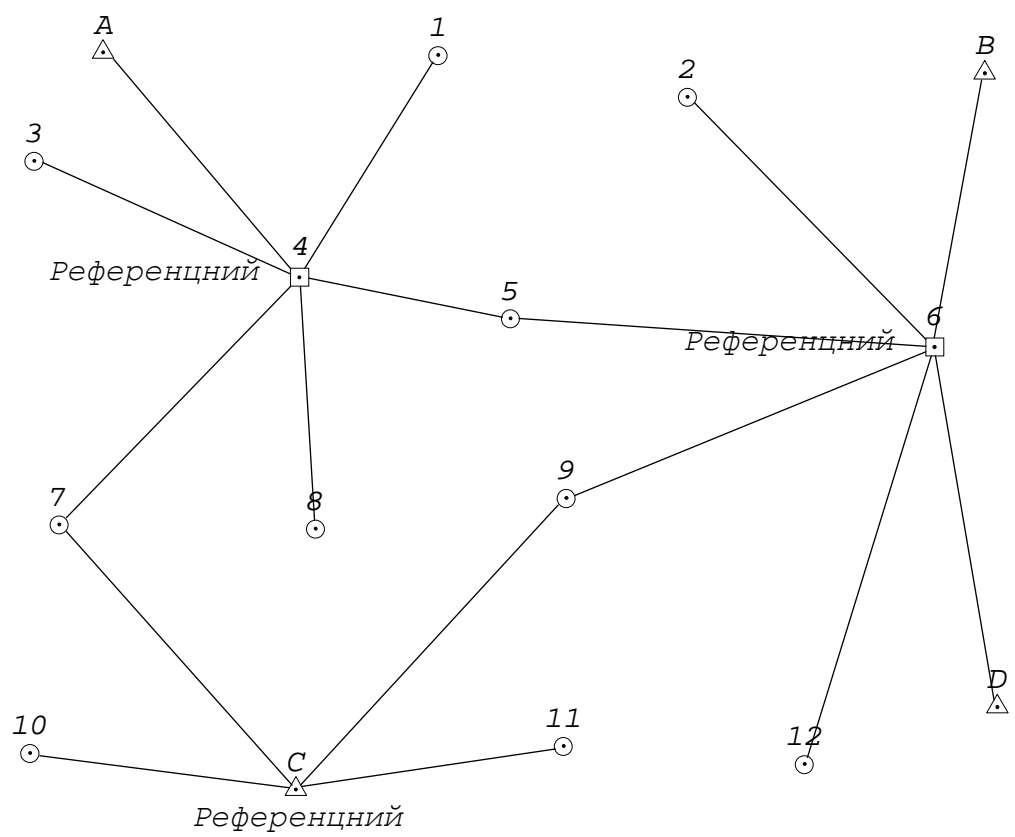


Рис. 8

## **9. ПРОЕКТУВАННЯ І ПЛАНУВАННЯ РОБІТ ПРИ СУПУТНИКОВИХ ВИМІРІВ**

### **План лекції № 10**

1. Складання технічного проекту.
2. Рекогносцировка пунктів, закладка центрів.

### **План лекції № 11**

1. Рекогносцировка пунктів, закладка центрів (продовження).
2. Складання робочого проекту.

### **9.1. СКЛАДАННЯ ТЕХНІЧНОГО ПРОЕКТУ**

Технічний проект складається на підставі технічного завдання. Робота над технічним проектом починається зі збору матеріалів раніше виконаних на об'єкті геодезичних робіт. У процесі збору матеріалів геодезичної вивченості повинні бути отримані такі відомості:

- 1) Матеріали обстеження існуючих пунктів геодезичних мереж.
- 2) Виписки з каталогів координат і висот пунктів, які можуть бути використані в якості вихідних в проектованій мережі.
- 3) Абрис і картки закладку існуючих пунктів.
- 4) Витяги зі звітів раніше виконаних робіт, особливо що стосуються оцінки точності.
- 5) Детальний довідка про системи координат і висот, прийнятих на об'єкті робіт.

Проводиться збір та систематизація картографічних (топографічних) матеріалів відповідного масштабу. На карти наноситься розташування всіх існуючих пунктів, які передбачається включити або прив'язати до проектованої мережі. При цьому необхідно оцінити ці пункти стосовно до нормальних умов спостережень для супутникових вимірів.

Вибір схеми побудови проектованої мережі та методів супутникових вимірів залежить від призначення мережі та її точності. Вибір проводиться

відповідно до вимог розділу 6, а також з урахуванням технічного завдання і матеріалів геодезичної вивченості. При виборі методу побудови мережі рекомендується керуватися параметрами, наведеними в таблиці 5.

Таблиця 5

Параметри	Схема побудови мережі	
	замкнених геометричних фігур	радіальний
Клас створюваної мережі	3 і 4-й клас ГГС, міські каркасні, спеціальні мережі, 1-й розряд	1-й, 2-й розряд, знімальні мережі
Відстань між пунктами	до 20 км	до 10 км і при різних по довжині векторах

Щільність пунктів створюваної мережі встановлюється у відповідності з діючими інструкціями. У процесі проектування рекомендується дотримуватися рівномірного розміщення визначаються пунктів по всьому об'єкту робіт.

При виборі місця розташування проектного пункту для супутникових вимірів необхідне дотримання наступних вимог:

- 1) Забезпечення нормальних умов спостережень.
- 2) Відсутність поблизу пункту (до 1-2 км) потужних джерел випромінювання (теле-і радіопередавачі і т. п.).
- 3) Більша частина горизонту навколо пункту не повинна мати перешкод вище 15°.
- 4) Забезпечення довготривалої схоронності центру.
- 5) Забезпечення зручного під'їзду, доступу до пункту в будь-який час незалежно від погодних умов.

На міській території рекомендується проектувати пункти на що піднімаються будівлях з урахуванням вимог, наведених вище, і вимог чинних інструкцій.

При можливості необхідно використовувати існуючі пункти ГГС, якщо вони відповідають вимогам, що пред'являються до пунктів створюваної мережі. Остаточне рішення про вибір місця розташування пункту приймається після виконання польовий рекогносцировки.

Вибір вихідних пунктів проводиться відповідно до вимог при забезпеченні нормальних умов спостережень.

Проектування геометричних зв'язків між пунктами проводиться відповідно до обраної схеми побудови. При побудові у вигляді замкнутих геометричних фігур кожен пункт має визначатися, як мінімум, двома незалежно вимірюються векторами. Висячі вектори не допускаються. У витягнутих мережах (ходах) для контролю вимірювань рекомендується проектувати зв'язку між кінцевими пунктами мережі (ходу).

При проектуванні необхідно передбачити повторні вимірювання визначених векторів: для проєктованих мереж згущення у складі ГГС 3-го і 4-го класу - у кількості не менше 50% і 25% відповідно від загальної кількості вимірів, для розрядних та знімальних мереж - на пунктах з поганими умовами спостережень. Повторні вимірювання рекомендується виконувати в інший час (вікно спостережень).

Для контролю рекомендується додатково проектувати вектори між вихідними пунктами, що дозволить оцінити надійність вихідної основи.

При визначенні довгих векторів (20 км) необхідно передбачити вимірювання метеорологічних параметрів: температури, атмосферного тиску, вологості повітря. Це дозволить виключити помилки, викликані впливом тропосфери. Вплив іоносфери виключається при вимірах двочастотні приймачами або при тривалому сеансі одночастотних приймачами. Облік метеорологічних параметрів виконується програмним забезпеченням.

Пункти ГГС, не включені в мережу в якості вихідних і розташовані на відстані не більше 5 км, повинні бути пов'язані з проєктованою мережею.

У проєкті визначається місце розташування референцних станцій для сеансу (сесії) або групи сеансів спостережень. Референцної станції можуть розташовуватися як на вихідних пунктах, так і на що визначаються. До референцної станції пред'являються підвищені вимоги у забезпеченні нормальних умов спостережень, тому що результати вимірювань під час залежать від якості роботи референцної станції.

Графічна частина проєкту складається на картах із зазначенням місця



розташування вихідних і обумовлених пунктів, зв'язків між пунктами проекрованої мережі, місця розташування референцних станцій.

Заключним етапом розробки технічного проекту є складання пояснювальної записки, яка повинна містити такі відомості:

1) Обґрунтування технічного проекту, нормативні документи, геодезична вивченість, фізико-географічна характеристика об'єкта робіт, що проектується роботи, система координат і висот.

2) Раніше виконані роботи: найменування пунктів геодезичного обґрунтування, назви робіт, найменування організацій, які виконували роботи, рік виконання, оцінка точності, система координат і висот.

3) Програма виконання робіт з обґрунтуванням обраної схеми і методів вимірювань.

4) Технологія виконання робіт з докладним викладом порядку і часу виконання робіт і здачі готової продукції.

5) Кошторис витрат на проектовані роботи.

## **9.2. РЕКОГНОСЦИРОВКА ПУНКТИВ, ЗАКЛАДКА ЦЕНТРІВ**

Після складання технічного проекту перед початком польових робіт проводиться польова рекогносцировка з метою уточнення окремих положень технічного проекту. У результаті рекогносцировки остаточно вибираються місця розташування пунктів, узгоджується схема мережі і вирішуються організаційно-технічні питання.

Пункти, на яких будуть виконуватися супутникові вимірювання, повинні відповідати встановленим вимогам. При рекогносцировці місць розташування пунктів необхідно враховувати наступне:

- повинні бути відсутніми відображають поверхні поблизу пункту, які можуть створити багатокільні (дерева, металеві огорожі, плоскі металеві дахи, інтенсивний рух транспорту, що відображає водна поверхня і т. п.);

- місце установки штатива повинна забезпечувати його стійкість на

період часу, необхідний для виконання вимірювань (особливо для референцних станцій), і безпека виробництва робіт;

- при використанні кінематичних методів вимірювань необхідно ретельно перевірити пункти і маршрути пересування між ними для забезпечення постійного захоплення 4-х супутників і відсутності перешкод; при наявних на шляху руху непереборних перешкод (мости, тунелі), по обидва боки перешкоди повинні бути запроектовані пункти для повторної ініціалізації мобільного приймача.

При неможливості встановлення приймача безпосередньо на пункті (металевий сигнал, велика кількість перешкод, багатоколійних тощо) необхідно вибрати місце розташування точки (або декількох точок) (робочий центр) з нормальними умовами спостережень для виконання позацентрено установки приймача. Обраний спосіб виконання позацентрено установки повинен забезпечувати точність проекрованої мережі.

У процесі спостереження після остаточного узгодження на знову визначених пунктах проводиться закладка центрів з урахуванням вимог діючих інструкцій.

Кожному що визначається пункту проекрованої мережі присвоюється індивідуальний номер (назву) та код.

Для кожного пункту складаються картки з описом місця розташування і прив'язкою його до місцевих предметів. Якщо на пункті є перешкоди для вимірювань, проводиться їх зйомка зі складанням схеми розташування перешкод. Вміщені в журналі відомості використовуються при робочому проектуванні.

Намічаються вектори (пункти), які будуть визначатися повторно.

У процесі спостереження уточнюються і коригуються маршрути руху між пунктами з визначенням приблизного часу переміщення з пункту на пункт.

### **9.3. СКЛАДАННЯ РОБОЧОГО ПРОЕКТУ**

Робочий проект складається на підставі технічного завдання, технічного проекту і матеріалів рекогносцировки з метою розробки оперативного плану виконання польових робіт та організаційних заходів.

Робочий проект складається перед виїздом на польові роботи і затверджується начальником партії та головним інженером експедиції.

Робочий проект повинен враховувати кількість і тип наявних приймачів, а також можливості програмного забезпечення для обробки вимірів.

У складі робочого проекту:

1) Складається схема розстановок приймачів у сеансах (сесіях) з не менш ніж одним загальним пунктом між суміжними сеансами (так званим «перекриттям»). Мінімальна кількість сеансів у статичному методі, необхідний для обчислення координат пунктів, визначається за формулою:

$$S = \frac{P - O}{N - O}, \quad (33)$$

де  $S$  - кількість сеансів,

$P$  - загальна кількість пунктів у мережі,

$O$  - число загальних пунктів у сеансах,

$N$  - кількість приймачів.

2) Уточнюється геометрична схема проектованої мережі.

3) Остаточна визначається місце розташування пунктів для референцних станцій.

4) Вибираються вектори в мережі, які будуть визначатися повторно. Рекомендується для виключення можливих приладових помилок приймача і антени повторні вимірювання виконувати іншими приймачами.

5) Складаються графіки значень DOP і видимості супутників на весь період польових робіт за допомогою програмного забезпечення по супутниковому альманаху.

6) Для пунктів, що мають перешкоди, з використанням програмного забезпечення складаються діаграми перешкод.

7) Для кожного пункту визначаються вікна спостережень з гарними показаннями DOP, з необхідною кількістю супутників і з урахуванням наявних перешкод. При цьому необхідно виключати інтервали з різкими,

стрибкоподібними коливаннями значення DOP.

Робочий проект завершується розробкою структури організації спостережень (програми спостережень), яка включає в себе наступне:

1) визначається тривалість сеансів в залежності від відстані між пунктами за формулами (при 5-ти супутниках і нормальному DOP):

Таблиця 6

Метод вимірювань	Тривалість сеансу при використанні	
	одночастотного приймача	двочастотного приймача
Статичний	30 хв + 3 хв/км	20 хв + 2 хв/км
Швидкостатичний		10 хв + 1 хв/км

2) Затверджуються маршрути руху між пунктами.

3) Складається розклад виконання супутникових вимірів для всіх виконавців.

Пояснювальна записка до робочого проекту повинна містити наступні розділи:

1) Проектовані роботи із зазначенням всіх пунктів мережі та їх зв'язків (схема мережі).

2) Програма робіт на об'єкті.

3) Графіки значень DOP і видимості супутників на весь період польових робіт.

4) Графіки вікон спостережень для всіх пунктів, що мають перешкоди.

5) Організація і технологія виконання робіт з обґрунтуванням вибору методу вимірювань і часу роботи на пунктах.

## **10. ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ СУПУТНИКОВИХ ВИМІРІВ**

### **План лекції № 12**

1. Вимоги до супутникових приймачів.
2. Перелік рекомендованого обладнання і його підготовка до роботи.

### **10.1. ВИМОГИ ДО СУПУТНИКОВИХ ПРИЙМАЧІВ**

Вибір типу приймача залежить від вимог конкретного проекту. Загальною вимогою до приймачів, що застосовуються в топографо-геодезичному виробництві є можливість виконання і кодових, і фазових вимірювань.

При виконанні високоточних робіт необхідно використовувати двочастотні приймачі, що дозволяють за рахунок вимірювань по двох частотах підвищити надійність і достовірність визначення векторів.

На коротких лініях (до 15 км) допускається використання одночастотних приймачів, так як вплив іоносфери на кінцях вектора однаково і виключається в процесі обробки.

Число незалежних приймальних каналів приймача має бути не менше чотирьох.

Об'єм пам'яті для запису супутникових вимірів повинен відповідати вимогам обраного методу вимірювань.

### **10.2. ПЕРЕЛІК РЕКОМЕНДОВАНИХ ОБЛАДНАННЯ І ЙОГО ПІДГОТОВКА ДО РОБОТИ**

Перед виїздом на польові роботи перевіряється комплектність станцій і працездатність окремих вузлів. У комплект станції повинні входити:

- приймач;
- антена;
- антенні кабелі;
- акумулятори та зарядний пристрій;
- сполучні кабелі;

- перехідники;
- штатив;
- підставка;
- становий гвинт;
- мірна стрічка або рейка;
- комплект для вимірювання метеорологічних параметрів: термометр, барометр, психрометри (при необхідності);
- радіостанції (при наявності).

Крім того, необхідно мати:

- карти, абрисы, схеми маршрутів;
- розклад спостережень і маршрути пересування між пунктами;
- польові журнали встановленого зразка;
- олівці, ручки, папір;
- прапорці, фарбу, кілки, молоток, попереджувальні сигнали і мигалку (для нічного часу доби) при роботі на проїжджій частині доріг.

Якщо програмою робіт передбачається польова обробка інформації, до складу обладнання бригади повинні бути включені:

- комп'ютер з програмним забезпеченням для обробки супутникових вимірів;
- комплект необхідних сполучних кабелів;
- блок живлення від стаціонарної мережі;
- дискети;
- ключова дискета до програмного забезпечення (або електронний ключ).

Усі механічні вузли станції повинні працювати справно. Штативи не повинні мати механічних дефектів. Оптичні центрири повинні бути перевірені і от'юстровані до виїзду на польові роботи.

Перед виїздом на об'єкт необхідно перевірити роботу зарядного пристрою і зарядити акумулятори живлення.

## **11. МЕТРОЛОГІЧНА АТЕСТАЦІЯ СУПУТНИКОВИХ ПРИЙМАЧІВ**

### **План лекції № 13**

1. Підготовка супутникових приймачів до атестації.
2. Визначення похибки вимірювання лінійних базисів в залежності від тривалості спостережень у статичному методі

### **План лекції № 14**

1. Визначення похибок вимірювання лінійних базисів в псевдокінематичному методі
2. Визначення похибок вимірювань збільшень координат у статичному методі по нев'язки в замкнених фігурах.
3. Визначення похибок вимірювань координат методом «Кінематика в режимі реального часу» (RTK).

### **11.1. ПІДГОТОВКА СУПУТНИКОВИХ ПРИЙМАЧІВ ДО АТЕСТАЦІЇ**

Супутникові приймачі, що застосовуються в геодезичному виробництві, повинні пройти державну атестацію та випробування з метою встановлення придатності для виконання відносних координатних визначень. Повірці піддається конкретний комплект приймачів, що складається з двох і більше приймачів та доданого програмного забезпечення.

Методика повірки базується на використанні еталонного базису. Періодичність повірки - один раз на рік.

В процесі проведення повірки повинні бути виконані операції, перераховані в таблиці 7.

Таблиця 7

№	Назва операції
1	Зовнішній огляд і випробування
2	Визначення похибки вимірювання лінійних базисів в залежності від тривалості спостережень у статичному методі
3	Визначення похибки вимірювань лінійних базисів в псевдокінематическом методі
4	Визначення похибки вимірювання збільшень координат у статичному методі по нев'язки в замкнутих фігурах
5	Визначення похибки вимірювань координат в режимі реального часу (RTK)

Для виконання повірки застосовуються засоби вимірювань, наведені в таблиці 8. Вони повинні бути повірені і мати діючі свідоцтва про повірку. Допускається застосування інших, які відповідають за точністю, засобів вимірювання, якщо вони повірені і мають свідоцтва про повірку. Абсолютна основна похибка використовуваного далекоміра повинна бути не більше  $1 \text{ мм} \times 10^{-6} D$ , де  $D$  - відстань вимірюється в мм.

Таблиця 8

№	Найменування засобів вимірювань, що застосовуються при виконанні повірки
1	Еталонний базис довжини
2	Високоточний світлодальноміри
3	Рулетка
4	Барометр-анероїд метеорологічний
5	Психрометри аспіраційний

Перед початком перевірки необхідно вивчити Керівництво користувача перевірюваного приймача, правила експлуатації, технологію виконання геодезичних робіт, рекомендовану фірмою-виробником. При необхідності слід внести корективи в методику перевірок.

Час виконання перевірок має бути заздалегідь сплановано для забезпечення нормальних умов спостережень, рекомендованих фірмою-виробником.

За результатами перевірок видається свідоцтво про придатність конкретного комплекту приймачів до застосування в геодезичному виробництві встановленого зразка.

Перед атестацією виконується зовнішній огляд апаратури та її випробування. Перевіряється комплектність обладнання відповідно з доданою документацією.

При зовнішньому огляді апаратури слід звернути увагу на справність перемикачів і кнопок, збереження пояснювальних написів, цілісність зовнішніх оболонок кабелів, чистоту контактів на роз'ємах.

Перевірити штатні акумулятори та зарядні пристрої. При необхідності зарядити акумулятори згідно з доданою документацією.

Перевірити працездатність апаратури відповідно з доданою документацією.

Апаратура, що має несправності, некомплектних, не працездатна бракується і до подальшої перевірки не допускається.



## **11.2. ВИЗНАЧЕННЯ ПОХИБКИ ВИМІРЮВАННЯ ЛІНІЙНИХ БАЗИСІВ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ТРИВАЛОСТІ СПОСТЕРЕЖЕНЬ У СТАТИЧНОМУ МЕТОДІ**

При виконанні повірки встановлюється наступний порядок робіт:

1) Встановити антени пари приймачів над центрами пунктів - кінців еталонного базису. За наявності орієнтирних стрілок (міток) на корпусах антен - орієнтувати їх на істинний північ. Виміряти висоту встановлення антени над центрами пунктів за допомогою рулетки (або що входять до комплекту приймача засобів вимірювань).

2) Включити приймачі. Перевірити робочі встановлення приймачів. Переконавшись, що приймачі приймають сигнали з супутників. Вимірювання виконуються у відповідності з рекомендаціями фірми-виробника.

3) Встановлювати послідовно тривалість сеансу вимірювань 60, 30, 15, 8, 4, 2 хвилини. Перед початком вимірювань в кожному сеансі виміряти метеопараметрів (температуру, тиск, вологість). Записати їх у журнал. Вимкнути приймач.

4) Виконати обробку результатів вимірювань за допомогою доданого програмного забезпечення. У обробку повинні прийматися якісні виміри. Якість вимірювань і результатів їх обробки визначається відповідно до вимог фірми-виробника.

5) Визначити  $\tau_{min}$  - мінімальний час сеансу, при якому виходять стійкі і надійні результати вимірів. Встановити тривалість одного сеансу 60 хв., Якщо  $\tau_{min} < 8$  хв. і 90 хв., якщо  $\tau_{min} > 8$  хв. Якщо в комплекті документації встановлено мінімальний час сеансу спостережень, то пункти 3) - 5) можна пропустити.

6) Повторити вимірювання при вибраній тривалості сеансу 6 разів, фіксуючи в кожному сеансі час початку спостережень. Половину вимірювань виконувати в інший день при іншому вікні спостережень.

7) Вимкнути апаратуру.

8) Виконати обробку спостережень.

Апаратура визнається придатним до експлуатації, якщо різниці між вимірами і еталонними значеннями базису не перевищують допустимого значення абсолютної основної похибки, обчисленої за формулою:

$$\Delta_{\text{дон}} = 2 \times (a + b \times 10^{-6} D), \quad (34)$$

де  $a$  і  $b$  - чисельні значення в мм, зазначені в що додається документації;  
 $D$  - довжина базису в мм.

### **11.3. ВИЗНАЧЕННЯ ПОХИБОК ВИМІРЮВАННЯ ЛІНІЙНИХ БАЗИСІВ В ПСЕВДОКІНЕМАТИЧНОМУ МЕТОДІ**

При виконанні перевірки встановлюється наступний порядок робіт:

- 1) Виконати дії згідно з вказівками в розділі 11.2., 1) і 2).
- 2) Встановити тривалість сеансу спостережень згідно з рекомендаціями фірми-виробника для роботи в псевдокінематичному методі. Провести вимірювання. Вимкнути приймач.
- 3) Перенести один приймач із кінцевого пункту базису на проміжний. Повторити дії 1) і 2). Якщо на базисі відсутні проміжні пункти, то вибрати на місцевості 5 додаткових пунктів на відстані 0,1-1 км від кінцевого пункту, закріпити їх як тимчасові точки і виміряти до них відстані за допомогою високоточної Світлодальноміри.
- 4) Повторити вимірювання по 3) ще на 4-х проміжних пунктах базису.
- 5) Повторити вимірювання на тих же пунктах через 1 (або більше) час.
- 6) Виконати дії по розділу 11.2., 7) і 8).

### **11.4. ВИЗНАЧЕННЯ ПОХИБОК ВИМІРЮВАНЬ ЗБІЛЬШЕНЬ КООРДИНАТ У СТАТИЧНОМУ МЕТОДІ ПО НЕВ'ЯЗКИ В ЗАМКНУТИХ ФІГУРАХ**

При виконанні даної перевірки встановлюється наступний порядок робіт:

- 1) Послідовно встановлювати приймачі в вершинах трикутника, обраного в мережі еталонного базису або примикають до еталонного базису геодезичних побудов (не більше 10 км для одночастотних приймачів і не більше 30 км для двочастотні).

2) Виконати дії за п. 11.2., 1) і 2).

3) Встановити тривалість сеансу вимірювань відповідно до п. 11.2. 5).

Виміряти метеопараметров. Провести вимірювання. Вимкнути приймач.

4) Виконати обробку спостережень.

5) Обчислити нев'язки збільшень координат у трикутнику.

Апаратура визнається придатним до експлуатації, якщо нев'язки збільшень координат у трикутнику не перевищують значень, обчислених за формулою:

$$W_{\text{дон}} = \sqrt{(\Delta_1^{\text{дон}})^2 + (\Delta_2^{\text{дон}})^2 + (\Delta_3^{\text{дон}})^2}, \quad (35)$$

де  $\Delta_i^{\text{дон}}$  - допустиме значення абсолютної основної похибки по стороні і трикутника, обчислена за формулою (34).

### **11.5. ВИЗНАЧЕННЯ ПОХИБОК ВИМІРЮВАНЬ КООРДИНАТ МЕТОДОМ «КІНЕМАТИКА В РЕЖИМІ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ» (RTK)**

При виконанні даної перевірки встановлюється наступний порядок робіт:

1) Встановити два приймача на пунктах з еталонними координатами.

2) Включити приймачі та підготувати їх до роботи у відповідності з Керівництвом користувача для роботи в режимі реального часу. Внести еталонні значення координат в пам'ять приймача, прийнятого за референцної.

3) Виконати визначення координат друге, мобільним, приймачем на 4-5 пунктах з еталонними координатами. Якщо є тільки два пункти з еталонними координатами, то допускається мобільний приймач зняти з пункту і, не вимикаючи його, пройти з антеною 100-200 м навколо пункту і знову встановити антену на пункті. Ці дії повторити п'ять разів.

4) Порівняти отримані координати з еталонними значеннями координат пунктів установки мобільного приймача.

Апаратура визнається придатним до експлуатації, якщо різниці між вимірами і еталонними значеннями координат не перевищують подвійного значення середньоквадратичне похибки визначення координат, зазначених у додається документації.

## **12. ВИКОНАННЯ СУПУТНИКОВИХ ВИМІРІВ**

### **План лекції № 15**

1. Статичний метод.
2. Швидкостатичний метод.

### **План лекції № 16**

1. Псевдокінематичний метод.
2. Метод Stop & Go ( "Стій - Іди") кінематика.
3. Кінематика в режимі реального часу (RTK - Real-Time Kinematic).

При виробництві супутникових вимірювань застосовуються методи, перераховані в розділі 7. Технологія виконання методів залежить від типу і моделі приймачів і програмного забезпечення для обробки вимірів. При виконанні робіт необхідно спиратися на Керівництво користувача використовуваного із супутника.

### **12.1. СТАТИЧНИЙ МЕТОД**

Статичний метод вважається «класичним» методом супутникових вимірів. Метод припускає, що вимірювання виконуються одночасно між двома і більше нерухомими приймачами тривалий період часу. За час вимірювань змінюється геометричне розташування супутників, яке відіграє значну роль у вирішенні неоднозначності. Великий обсяг вимірювань дозволяє зафіксувати пропуски циклів і правильно їх змодельовати.

Статичний метод застосовується при виконанні високоточних робіт, при вимірах векторів більше 15-20 км, а також при обмежених вікнах спостережень з мінімальною кількістю супутників.

Тривалість сеансу залежить від довжини вимірюваних під час ліній, кількості одночасно ведеться спостереження супутників, типу приймачів і необхідної точності. Протягом 90% часу спостережень під час повинні прийматися сигнали не менше ніж від 4-х супутників.

Основні вимоги статичного методу:

- спостереження на пункті не менше 4-х супутників;
- інтервал запису - 20 сек.

Робота на станції починається з установки антени. Штатив, на якому встановлюється антена, повинен бути надійно закріплений для забезпечення незмінності висоти антени під час вимірювань. Центрування та нівелювання антени виконується оптичним центриром з точністю  $\pm 2$  мм. За наявності орієнтирних стрілок (міток) антена орієнтується на північ.

Всі супутникові вимірювання відносяться до фазового центру антени. Тому потрібно ретельно вимірювати висоту антени. Помилка вимірювання висоти антени впливає на точність визначення всіх трьох координат пункту. Висота вимірюється рулеткою або спеціальним пристроєм двічі: до і після спостережень. Якщо різниця висот антени на початку і наприкінці сеансу перевищує 2 мм, то цей сеанс з обробки виключається, а до 2 мм - усереднюється. Вимірювання виконуються у відповідності з Керівництвом користувача використовуваного приймача і записуються в журналі встановленого зразка.

Включення приймача, процедура вимірювання та вимкнення приймача проводиться у відповідності з Керівництвом користувача.

Виміри починаються згідно із затвердженим «Розклад супутникових вимірів». Дозволяється включення приймача за 5 хвилин до встановленого початку вимірювань. Запізнення не допускається, так як це зменшить час спільної роботи приймачів під час і може погіршити результат. Для уточнення часу роботи приймачів під час рекомендується мати між виконавцями (бригадами) радіозв'язок. Рішення про дострокове припинення сеансу приймає керівник робіт.

Перед початком вимірювань перевіряються (встановлюються) робочі установки приймача, такі як кут відсічення (маска) спостережуваних супутників, інтервал запису, збереження вимірювань і обсяг вільної пам'яті. Інтервал запису повинен бути однаковим для всіх спільно працюють приймачів. Після включення приймача необхідно переконатися, що приймач відслідковує

необхідну кількість супутників і обчислює своє місце розташування.

До початку сеансу спостережень в приймач вводиться назва пункту, висота антени, код оператора та інша інформація, введення якої передбачено Керівництвом користувача. Паралельно ведуться записи в польовому журналі встановленого зразка.

У процесі спостережень необхідно перевіряти роботу приймача кожні 15 хвилин. Перевіряються: електроживлення, збої у прийомі супутникових сигналів, кількість захоплених супутників, значення DOP. При погіршенні цих показників рекомендується збільшити час спостережень. Результати перевірок записуються в польовому журналі. У примітці також записуються всі порушення в нормальній роботі станції.

При необхідності під час сеансу вимірюються метеопараметров: температура повітря, тиск, вологість. Результати записуються в польовому журналі.

Необхідною умовою безперебійної роботи приймача на станції є безперервність подачі електроживлення. У комплекті приймача на станції повинні бути заряджені запасні батареї (акумулятори). У разі збою в електроживленні необхідно якомога швидше підключити запасну батарею. При цьому, якщо приймач не діяв більше 10% від часу вимірювань відповідно збільшується тривалість сеансу.

Супутникові приймачі працюють в температурному діапазоні, установленому виробником. Атмосферні опади, туман і т. п. не впливають на роботу приймача. Розряди атмосферної електрики можуть викликати збої у вимірах. При холодній погоді знижується час роботи акумуляторів.

## **12.2. ШВИДКОСТАТИЧНИЙ МЕТОД**

Швидкостатичний метод (ШСМ) супутникових вимірів поєднує в собі високу точність статичного методу з перевагою короткого часу спостережень. Це досягається за рахунок оптимального використання всіх доступних якісних вимірів при двох частотах. ШСМ реалізується двочастотні приймачами за

наявності програми обробки вимірів. З-за короткого періоду вимірювань СМ чутливий до нестачі вимірювань. Так само робить вплив розташування і кількість захоплених супутників, інтервал запису.

ШСМ застосовується при вимірах векторів до 10-15 км, в мережах з великою кількістю пунктів (точок). Тривалість сеансу залежить від довжини вимірюваних під час ліній.

Основні вимоги ШСМ:

- спостереження на пункті не менше 5-і супутників;
- при переміщенні з пункту на пункт підтримувати захоплення не потрібно;
- інтервал запису - 5-10 сек.

Порядок роботи на станції і вимоги аналогічні статичного методу (див. розділ 12.1.).

### **12.3. ПСЕВДОКІНЕМАТИЧНИЙ МЕТОД**

При створенні розрядних та знімальних мереж окрім статичного і швидка можуть використовуватися більш продуктивні методи вимірювань, значно скорочують час вимірювань, - псевдокінематичну і Stop & Go кінематика, а також їх варіанти.

Псевдокінематичний метод (ПКМ) застосовується, в основному, при роботі з одночастотних приймачами.

ПКМ зменшує час вимірювань в порівнянні зі статичним методом за рахунок використання двох 5-10 хвилинних періодів спостережень, розділених годинниковим (і більше) інтервалом, з тим щоб змінилося взаємне розташування спостережуваних супутників. Це означає, що мобільні приймачі можуть відвідати кілька пунктів (точок) створюваної мережі по 5-10 хв вимірювань на кожному протягом приблизно однієї години. Потім цикл повторюється за тими ж пунктами. У процесі постобробки виміру, отримані в першому і повторне відвідування, об'єднуються в одне рішення. Недолік ПКМ - необхідність подвійного відвідування пункту, що збільшує час, що витрачається на переміщення і установку на пункті.

ПКМ застосовується в мережах з короткими відстанями між пунктами, а також у випадку, коли не вдалося вирішити неоднозначність при вимірах іншими методами.

Основні вимоги ПКМ:

- спостереження не менше 4-х супутників в обох відвідування пункту;
- інтервал запису - 5-10 сек;
- перерва між відвідинами не менше години (див. Посібник користувача конкретним приймачем);
- однакова висота антени в обох відвідування пункту (див. Посібник користувача).

Залежно від обраної схеми побудови мережі застосовуються різні варіанти ПКМ.

Радіальний ПКМ - метод визначення координат пунктів мобільними приймачами щодо однієї (або більше) референцної станції. На рис. 9 показана схема для одного референцних і одного мобільного приймачів.

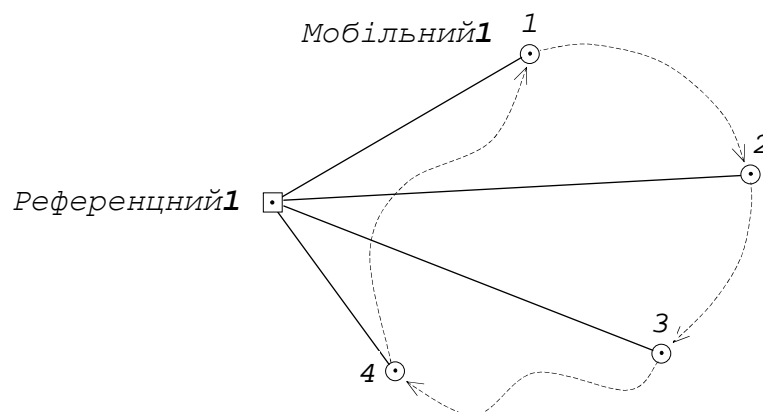


Рис. 9

Один приймач знаходиться на пункті, вибраному як референцної (референцної станція). Мобільний приймач переміщається з пункту на пункт (з 1-го по 4-й) як у Stop & Go методі, але без постійного захоплення супутників. Вимірювання на кожному пункті виконуються протягом 10 хвилин, потім приймач переміщують на наступний пункт і т.д. Повторні вимірювання на всіх



пунктах повинні бути виконані через приблизно одну годину (див. Посібник користувача). При повторному вимірі на пункті його номер (код, ідентифікатор) повинен бути таким же, як і при першому відвідуванні. Програмне забезпечення виконує визначення координат пунктів з двох сеансів вимірювань та їх ідентифікація проводиться за номерами точок. Однакова висота антени в повторних відвідинах забезпечується застосуванням спеціальної віхи з рівнем. Траверсний ПКМ - метод (так званий "стрибки жаби" - Leap Frog), в якому немає референцної станції і всі приймачі, які беруть участь у вимірах, - мобільні. Застосовується, в основному, у витягнутих мережах (ходах) На рис. 10 показана приблизна схема для двох мобільних приймачів.

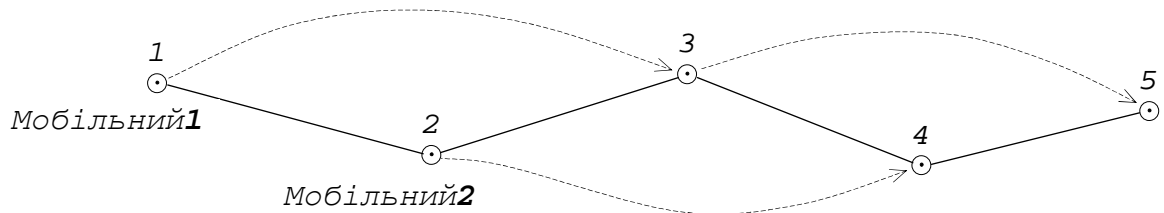


Рис. 10

Порядок виконання вимірювань наступний:

- 1) Встановити обидва мобільних приймача на пунктах 1 і 2, виконати визначення вектора 1-2 в протязом 10 хвилин.
  - 2) Перемістити приймач з пункту 1 на пункт 3, виконати визначення вектора 2-3.
  - 3) Перемістити приймач з пункту 2 на пункт 4, виконати визначення вектора 3-4.
  - 4) Перемістити приймач з пункту 3 на пункт 5, виконати визначення вектора 4-5.
  - 5) Повторити вимірювання на всіх пунктах. При цьому приймачі повинні відвідати ті ж пункти, що і в перший раз (див. Посібник користувача)
- Можливе застосування комбінації радіального і траверсного ПКМ. На рис. 11 показана схема для одного референцних і двох мобільних приймачів.

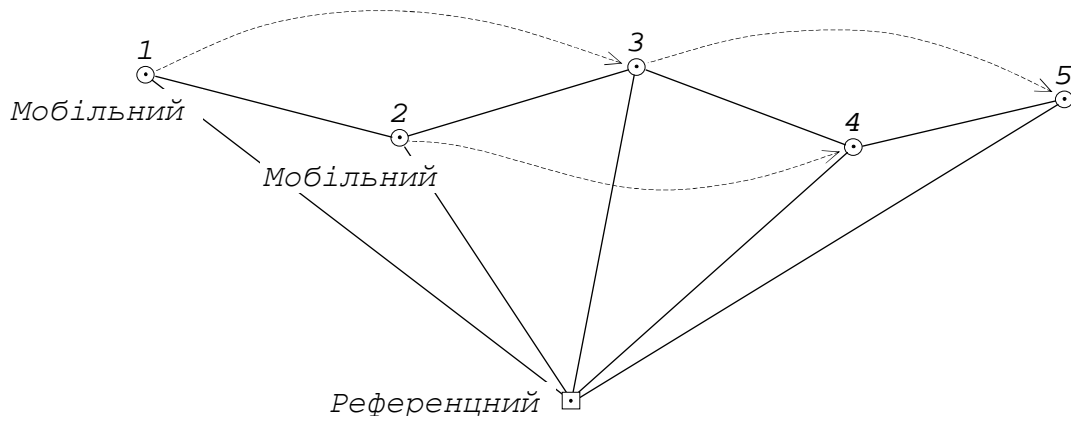


Рис. 11.

Один приймач знаходиться на пункті, вибраному як референцної (референцної станція). Мобільні приймачі переміщуються з пункту на пункт, як у траверсному ПКМ. При цьому бажано виконувати вимірювання трьома приймачами одночасно. Тоді в результаті обробки вимірювань будуть визначені вектори між референцних і визначаються пунктами і, додатково, вектори між визначеними пунктами.

Варіант траверсного ПКМ з використанням трьох мобільних приймачів аналогічний статичного методу, але з подвійним відвідуванням пунктів.

1) Перше розміщення приймачів:

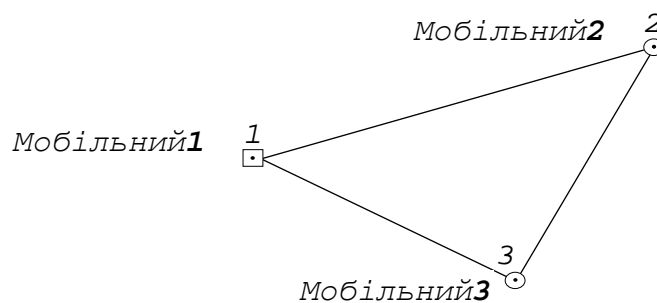


Рис. 12

Таблиця 9.

Вектор	Від приймача	До приймача	Номер сеансу	Тривалість сеансу
1 – 2	1	2	1-й сеанс	10 хв.
1 – 3	1	3	1-й сеанс	10 хв.
2 – 3	2	3	1-й сеанс	10 хв.

2) Друге розміщення приймачів:

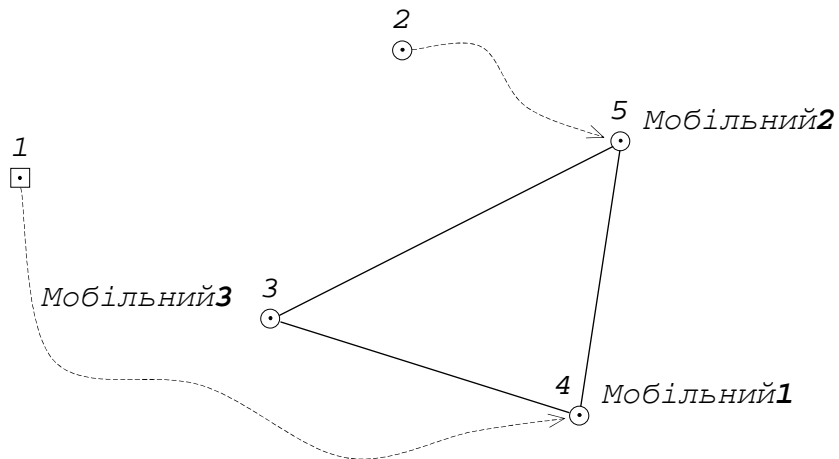


Рис. 13

Таблиця 10.

Вектор	Від приймача	До приймача	Номер сеансу	Тривалість сеансу
3 – 4	3	1	2-й сеанс	10 хв.
3 – 5	3	2	2-й сеанс	10 хв.
4 – 5	1	2	2-й сеанс	10 хв.

3) Третє розміщення приймачів:

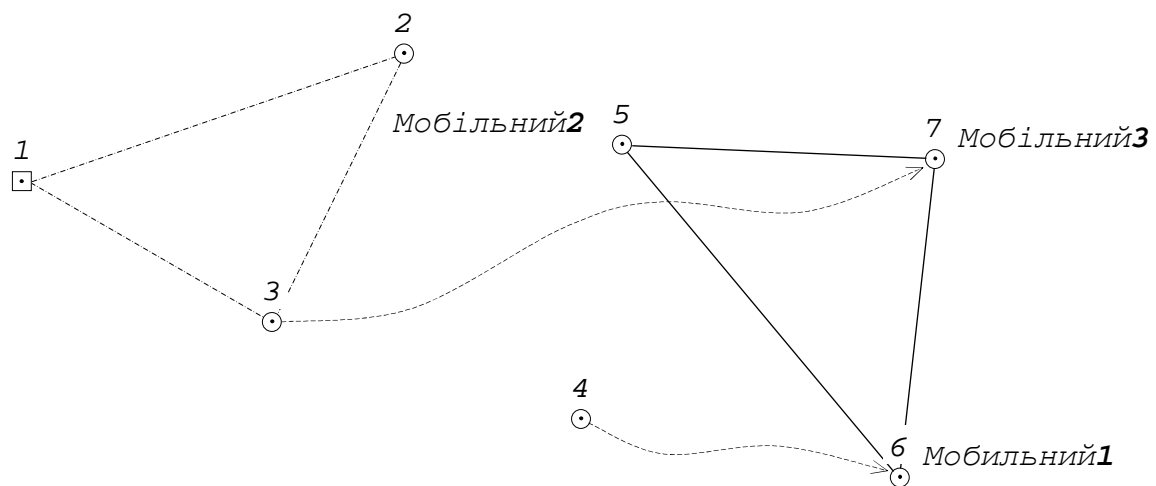


Рис. 14

Таблиця 11.

Вектор	Від приймача	До приймача	Номер сеансу	Тривалість сеансу
5 – 6	2	1	3-й сеанс	10 хв.
5 – 7	3	2	3-й сеанс	10 хв.
6 – 7	1	2	3-й сеанс	10 хв.

Повторити вимірювання на пунктах в тому ж порядку.

Порядок роботи на станції і вимоги аналогічні статичного методу (див. розділ 12.1).

#### 12.4. МЕТОД STOP & GO ( «СТІЙ–ІДИ») КІНЕМАТИКА

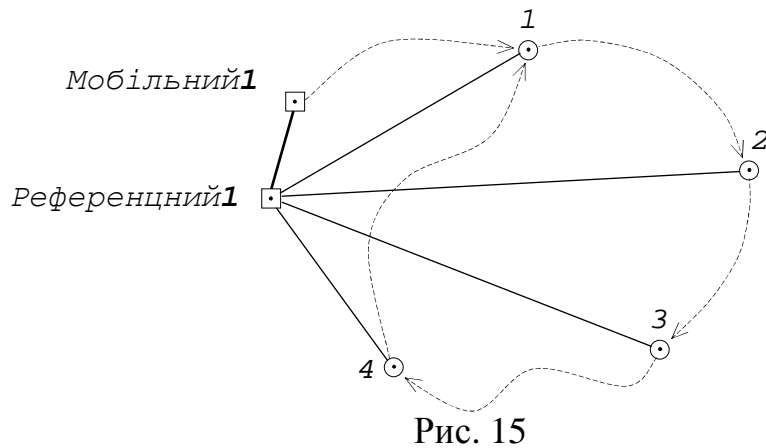
Метод Stop & Go передбачає виконання одночасних спостережень між референцної і мобільним (одним і більше) приймачами. Визначення координат виконується за безпосередньої установки антени на визначених пунктах, тобто вимірювання відносяться до закріплених точок на місцевості. За рахунок безперервності роботи приймачів зростає обсяг вимірювань, що дозволяє отримати точність, яку можна порівняти із статичним методом.

Метод Stop & Go застосовується в мережах з великою кількістю пунктів (точок) на відкритій місцевості. Тривалість часу вимірів на пункті - до 1-2 хв.

Основні вимоги методу Stop & Go:

- вирішення неоднозначності до початку виконання вимірювань (ініціалізація);
- підтримання постійного захоплення не менше 4-х супутників під час руху;
- інтервал запису - 5-10 сек (див. Посібник користувача);
- при втрату захоплення супутників необхідно повернутися на попередню певну точку і повторити вимірювання або заново виконати процедуру ініціалізації.

У Stop & Go для зв'язку вимірювань під час руху мобільного приймача до початку вимірів повинна бути вирішена неоднозначність, тобто виконана ініціалізація приймача. Існує декілька способів ініціалізації: статична сесія, обмін антен, відома базисна лінія, On-The-Fly (On-The-Way) - ініціалізація в польоті (у дорозі).



1) При статичній (швидкостатичний) сесії виконуються одночасні вимірювання на двох пунктах протягом тривалого часу (не менше 1-ї години для статичного методу). Координати одного з пунктів повинні бути відомі. В якості другого пункту може використовуватися будь-яка тимчасова точка (Мобільний1), обрана для ініціалізації, або перше визначається точка 1 (див. рис. 15). Відстань між точками може бути від 2 м до 1 км.

2) При обміні антен на відстані 5-10 м від вихідного пункту вибирається тимчасова точка (Мобільний1). На пунктах Референційний1 і Мобільний1 виконують вимірювання протягом 5-10 хв з не менш ніж 4-х супутників. Потім змінюють антени місцями, підтримуючи постійний захоплення не менше 4-х супутників. При новій установці продовжують вимірювання протягом 5-10 хвилин, після чого антени повертаються в початкове, вихідне положення. Необхідною умовою є однакова висота антени при першому і повторної установки.

3) При використанні відомої базисної лінії (з точністю  $\pm 5$  см), виконують 2-х-хвилинний сеанс спостережень на пунктах цієї лінії, після чого приступають до безпосередніх до вимірювань.

4) On-The-Fly підтримується тільки двочастотні приймачами при можливості програмного забезпечення вирішувати неоднозначність при такій ініціалізації. Для вирішення неоднозначності достатньо накопичити безперервні (без пропуску циклів) вимірювання при постійному захопленні не менш ніж 5-ти супутників протягом деякого періоду часу, причому мобільний

приймач може негайно починати вимірювання на визначених пунктах. При втраті захоплення триває процедура вимірів і протягом наступного інтервалу часу з 5-ю супутниками вирішується неоднозначність. Кількість супутників впливає на час вирішення неоднозначності: чим більше супутників, тим менше час ініціалізації. Для отримання повної інформації необхідно звернутися до Посібника користувача конкретним типом із супутника.

Залежно від кількості приймачів і взаємного розташування пунктів можливі різні варіанти використання Stop & Go. Типовими схемами є радіальний та траверсний. У радіальному методі для контролю рекомендується виконувати повторні визначення пунктів, в траверсному - виконати замикання між початковим і кінцевим пунктом.

При використанні двох приймачів одна знаходиться на референційній пункті, а друга (мобільний) переміщається по визначених пунктах. При повторному відвідуванні можна зберегти референційну станцію або перемістити її на другий пункт (див. рис. 16). Для отримання незалежних результатів вимірювань необхідно, щоб різниця в часі між повторними сеансами становила близько 1 години, протягом якого зміниться геометричне розташування супутників.

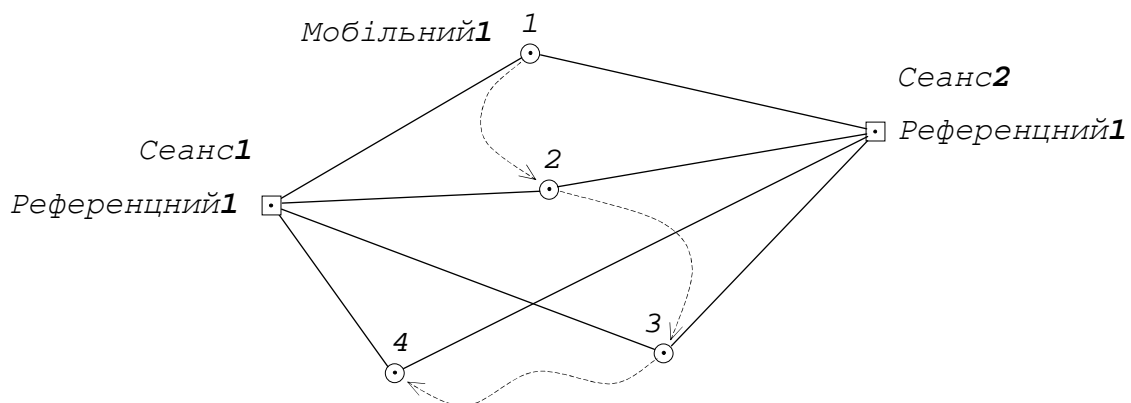


Рис. 16

При використанні трьох приймачів одна знаходиться на референційній пункті, а два мобільних приймача (одночасно) переміщуються по визначених точках - назустріч або слідом один одному (див. рис. 17).

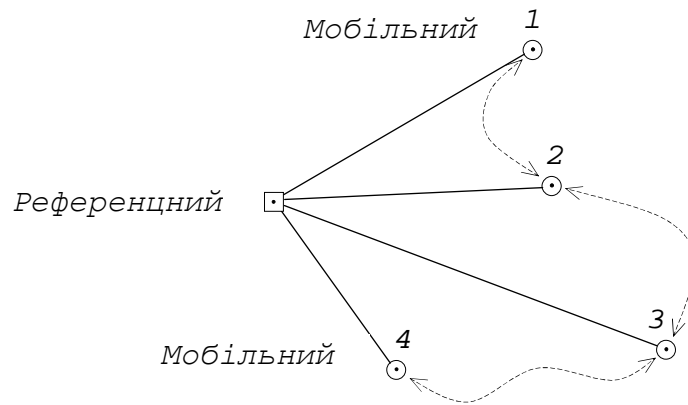


Рис. 17

Можливий інший варіант, коли дві приймача знаходяться на референційних пунктах, а третій переміщається по визначених точках (див. рис.18).

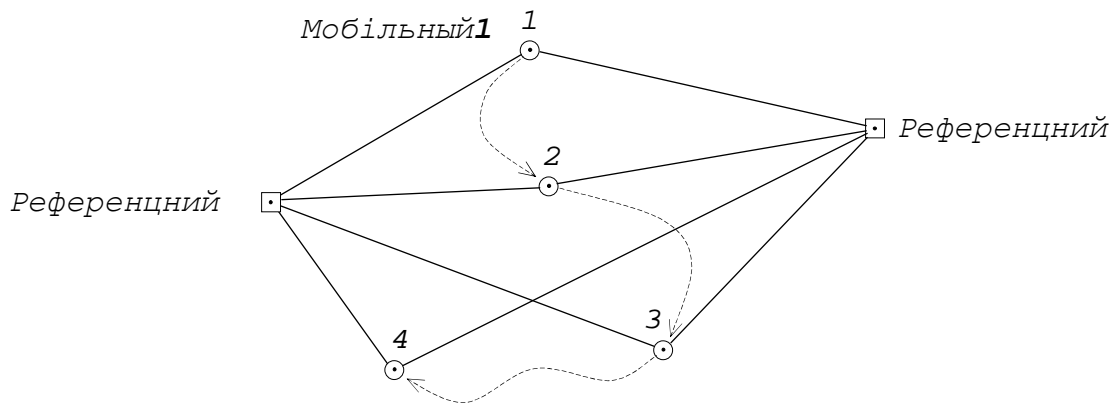


Рис. 18

При використанні чотирьох приймачів рекомендується використовувати два референційної станції та два мобільні. Це дозволить виміряти за чотири вектора на кожен обумовлений пункт і виконати два незалежних визначення координат (див. рис. 19).

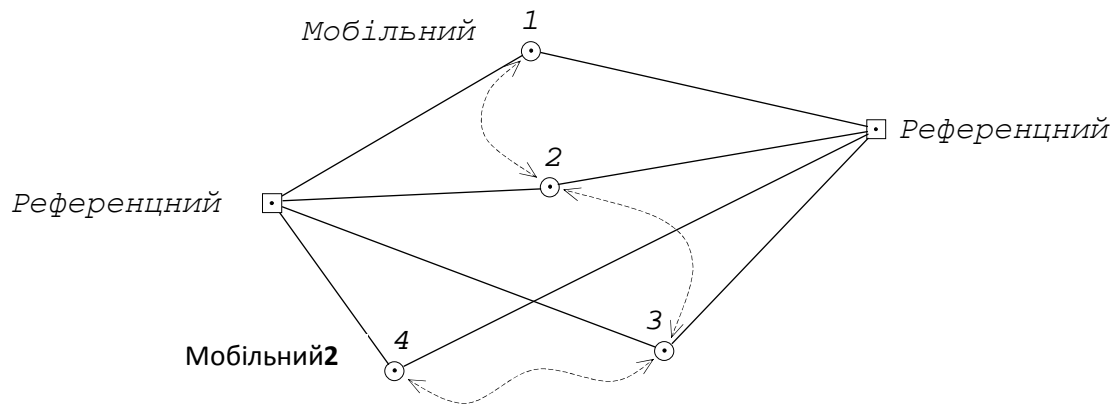


Рис. 19

Порядок роботи на референцній станції та вимоги аналогічні статичного методу (див. розділ 12.1.). Установка на референцних і мобільному приймачах виконуються у відповідності з Керівництвом користувача.

Порядок роботи на мобільній станції встановлюється Керівництвом користувача.

При переміщенні з пункту на пункт необхідно підтримувати постійний захоплення супутників. При втраті захоплення супутників необхідно повернутися на попередню певну точку і повторити вимірювання, або заново виконати процедуру ініціалізації.

Після закінчення вимірів рекомендується виконати замикання на перший пункт. Це дозволить у разі необхідності виконати обробку вимірювань з кінця спостережень.

## 12.5 КІНЕМАТИКА В РЕЖИМІ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ (RTK - REAL-TIME KINEMATIC)

Для виконання вимірювань методом RTK необхідне наступне устаткування; референцної станція, одна (або більше) мобільна станція, спеціальне обладнання для передачі даних з референцної на мобільний приймач (радіомодем), спеціальне програмне забезпечення приймачів.



Референційна станція встановлюється на пункті з відомими координатами. Референційний приймач обчислює і передає по лінії зв'язку поправки до вимірювання псевдовідстаней на мобільний приймач. Поправки визначаються як різниця вимірювання псевдовідстаней і істинної дальності, обчисленої за точними координатами, введеним в приймач. Визначення виконується кожну епоху спостережень. Мобільний приймач вводить прийняті поправки до вимірюваним псевдовідстаней і виправлені значення дальностей використовує для обчислення свого становища.

Координати визначаються негайно в польових умовах. RTK застосовується в мережах з великою кількістю пунктів (точок) на відкритій місцевості, при створенні знімальних мереж. Тривалість часу вимірів на пункті - менше 1 хв.

Основні вимоги аналогічні вимогам методу Stop & Go, а технологія виконання вимірювань методом RTK аналогічна технології методу Stop & Go.

Особливі вимоги пред'являються до засобів передачі поправок - Радіомодем. Референційну станцію рекомендується встановлювати на відкритому, піднесеному місці для забезпечення безперешкодної радіозв'язку між приймачами і збільшення радіусу дії радіомодеми. Перед початком вимірювань необхідно перевірити кабельні з'єднання і переконатися, що зв'язок з мобільним приймачем встановлена.

### 13. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ОБРОБКИ РЕЗУЛЬТАТІВ СУПУТНИКОВИХ ВИМІРЮВАНЬ

#### План лекції № 17

1. Модуль Transfer.
2. Модуль Planning.
3. Модуль Process.
4. Модуль Adjust.
5. Модуль GPS/CADD.
6. Модуль Database.
7. Модуль Setup.
8. Модуль Tools.

Складовою частиною комплекту геодезичних супутникових приймачів є програмне забезпечення для планування, управління, обробки і складання підсумкового звіту за даними супутникових вимірів. У цьому розділі розміщено короткий опис програми PRISM фірми ASHTECH. Програмні забезпечення інших фірм по своїй структурі і виконуваних функцій аналогічні PRISM.

PRISM складається з системи модулів (програм), кожен з яких виконує певне завдання. Список та короткий опис модулів наведено в таблиці 12.

Таблиця 12.

№	Найменування	Цільове призначення
1	Transfer	Перенесення файлів вимірювань з приймача в комп'ютер
2	Planning	Планування спостережень
3	Process	Обробка файлів вимірювань
4	Adjust	Врівноваження
5	GPS/CADD	Графічне представлення результатів робіт
6	Database	Робота з даними обробки і вимірювань
7	Setup	Встановлення та зміна параметрів програми
8	Tools	Службові утиліти

Модулі повністю сумісні і дозволяють вільно перемикатися між собою під управлінням оболонки PRISM.

Програма Transfer дозволяє вивантажити файли з приймача в комп'ютер для подальшої обробки: бінарні файли з інформацією по фазовим вимірів, бінарні ефемеридні файли, файли з інформацією про точку стояння. Transfer

може вивантажити з приймача поточний супутниковий альманах. Альманах входить до складу супутникового повідомлення і включає в себе інформацію про наближених орбітах всіх супутників.

Програма Planning дозволяє згідно даними супутникового альманаху вибирати час спостережень для забезпечення нормальних умов спостережень за кількістю супутників і значенням DOP з урахуванням наявних на пункті перешкод. Вибір вікна спостережень виконується за наступними параметрами: місце розташування пункту, дата і час вимірювань, кут відсічення супутників, номери супутників, перешкоди на пункті. Дані можна записати в базу даних модуля Database.

Планування сеансів спостережень є відповідальним елементом супутникової технології. Основна мета планування спостережень - вибір оптимального інтервалу часу виконання вимірювань (вікно спостережень) з достатньою кількістю спостережуваних супутників, з гарним показником DOP і з урахуванням впливу перешкод на станції спостережень.

Початок і закінчення сеансу спостережень визначається в залежності від наступних факторів:

- кількість видимих супутників;
- наявність перешкод проходження супутникових сигналів на пунктах спостережень;
- географічних координат пункту спостережень;
- дати спостережень;
- інтервалу робочого часу в місцевій шкалі часу.

Програма планування дозволяє вирішити такі завдання:

- на основі рекогносцировки змодельовати схему перешкод на пункті і записати в базу даних;
- обчислити і показати графіки проходження супутників над заданим пунктом із зазначенням номерів супутників;
- обчислити і показати графічно кількість видимих і доступних

супутників в заданий інтервал часу;

- обчислити і показати графік показника DOP, який дозволить вибрати інтервали часу з низьким DOP.

Програма Process дозволяє визначити просторові вектори і робити оцінку точності за внутрішньою збіжності. Process обробляє С/А-кодові вимірювання, фазові вимірювання на  $L_1$  і Р-кодові, фазові вимірювання на  $L_2$ . У Process можна вибирати режим обробки в залежності від методів вимірювань, вводити дані про пункт стояння (висота антени, метеопараметров і т. п.), обробляти дані в автоматичному або в ручному режимі.

Мета попередньої обробки у відносному методі супутникових вимірів - обчислити просторовий вектор між одночасно працювали приймачами, збільшення прямокутних просторових координат  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ ,  $\Delta Z$ , похиле відстань  $D$  і геодезичні координати  $B$ ,  $L$ ,  $H$  обумовленого пункту щодо початкового.

Обробка фазових вимірювань на частоті  $L_1$  виконуються в наступному порядку:

- 1) За третій різницям виявляються втрати фазових циклів і в першому наближенні визначаються координати обумовленого пункту спостережень.

- 2) По друге різницям визначаються фазові неоднозначності і більш точні значення координат (плаваюче рішення неоднозначності).

- 3) Фазові неоднозначності округлюються до найближчих цілих, після чого рішення повторюється. Невідомими є координати пунктів, на яких неоднозначності не вирішиться до цілого в попередньому рішенні.

- 4) Остаточне рішення по другому різницям з фіксованими значеннями неоднозначностей. Невідомими є тільки координати обумовленого пункту.

У якості вихідних даних при обробці служать:

- Координати початкового пункту ( $B$ ,  $L$ ,  $H$ ).
- Висоти антен над центрами пунктів.
- Поточні координати супутників, поправки годин супутника і параметри іоносферної затримки (із супутникових повідомлень).

- Виміряні фази несучої частоти для всіх спостережуваних супутників і псевдовідстаней на момент спостережень.

У процесі попередньої обробки проводиться оцінка якості спостережень за критерієм величини середньоквадратичне похибки (СКП) різницевого рішення (RMS), параметру якості фіксованого рішення (Ratio).

Програма Adjust призначена для врівноваження мережі. Вона може імпортувати вектори, обчислені в модулі Process, або що зберігаються в Database, вводити координати вихідних пунктів, визначати станції як фіксовані чи то вільні, надавати їм ваги, ставлячи похибка координат вихідних пунктів, виключати пункти або вектора з зрівнювання; виконувати зрівнювання в тривимірній системі координат, виконувати оцінку якості вимірів за нев'язки в замкнутих фігурах.

Модуль Fillnet, що входить до Adjust, виробляє два варіанти вирівнювання - вільне і невольне. При зрівнюванні вільної мережі проводиться внутрішнє узгодження всіх векторів. При зрівнюванні невольною мережі, крім звичайних завдань, додатково визначаються параметри трансформації (масштаб мережі, кути розвороту і зсув центру). За результатами врівноваження видається статистична інформація з оцінкою точності виконаного зрівнювання.

Програма GPS/CADD дозволяє представляти результати зрівнювання і спостережень в графічній формі для аналізу і включення в остаточний звіт.

Програма Database дозволяє вводити інформацію про вектори і станції з різних джерел, включаючи пункти ГГС і результати окремих зрівнювання, редагувати введені дані, запитувати точки за координатами або іншими ознаками, графічно відображати вектори та інформацію про пункти, що сприяє оперативній розробці проекту і відбраковування сторін мережі, вибирати вектори для створення файлів зрівнювання, роздруковувати інформацію про пункти і вектори для цілей рекогносцировки і для складання остаточного звіту. Треба подивитися

Вікно Setup дозволяє встановити параметри обладнання (комп'ютера). Програма Tools дозволяє виконувати перетворення координат у систему координат користувача, перетворення супутникових вимірів у формат RINEX і т. п. функції.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Соловьев Ю.А. Системы спутниковой навигации. - М.: Еко-Трендз, 2000. 267 с.
2. Глобальная спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС. Под ред. В. Н. Харисова, А. И. Перова, В. А. Болдина. - М.: ИПРЖР, 1998. - 400 с.: ил.
3. Серапинас Б.Б. Основы спутникового позиционирования. М., ИКФ «Каталог», 2002. – 106 с.
4. Шебшаевич В. С., Дмитриев П.П., Иванцевич Н.В. Сетевые спутниковые радионавигационные системы; Под ред. В. С. Шебшаевича.- 2-е изд., перераб. И доп. - М.: Радио и связь, 1993. - 408 с.: ил.
5. Генике А.А., Побединский Г.Г. Глобальные спутниковые системы определения местоположения и ее применение в геодезии. М., “Картгеоцентр” - “Геодезиздат”, 1999.
6. Яценков В.С. Основы спутниковой навигации. Системы GPS NAVSTAR и ГЛОНАСС. – М.: Горячая линия – Телеком, 2005. – 272 с.
7. Система геодезических параметров земли "Параметры Земли 1990 года" (ПЗ-90) Галазин В.Ф., Каплан Б.Л., Лебедев М.Г., Максимов В.Г., Петров Н.В., Сидорова-Бирюкова Т.Л./ Под ред. Хвостова В.В. - М. Координационный научно-информационный центр, 1998. 37с.
8. ГКИНП (ОНТА)-02-262-02. Инструкция по развитию съемочного обоснования и съемке ситуации и рельефа с применением глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS/Под общей редакцией Л.В. Неверова.– М.: ЦНИИГАиК, 2002.– 124с.
9. Постнов А.В., Вергунов Е.Г. Основы геодезического обеспечения археологических исследований с применением спутниковых навигационных приёмников./Отв. ред. В.Е. Ларичев.– Новосибирск: Свет, 2003.– 160с.
10. Леотьев В.К. GPS: Все, что Вы хотели знать, но боялись спросить. Неофициальное пособие по глобальной системе местопределения. М.: Литературное агентство «Бук –Пресс». 2006. – 352 с.

11. Глобальна система визначення місцеположення (GPS). Теорія і практика/Б. Гофманн-Велленгоф, Г. Ліхтенеггер, Д. Коллінз; Пер. з англ. третього вид. під ред. Я. С. Яцківа— Київ: Наук, думка, 1995.—380 с.
12. Найман В.С. GPS-навигатори для путешественников, автомобилистов, яхтсменов = Лучшие GPS-навигаторы/В.С. Найман. Под научной редакцией В.В. Скрилева. – М. НТ. Прес. 2008 – 400 с.
12. Краснорильов І. І. Основи спутникової геодезії – М.: Недра, 1991–112 с.
13. Болдин В. А., Зубинский В. И. и др. Глобальная спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС – М.: ИПРЖР, 1998. – 78 с.
14. Хофманн-Велленхоф Б., ЛихтенЕггер Х., Коллинс Дж. Глобальная система определения местоположения. Теория и практика – Шпрингер-Ферлаг, Вена, Нью-Йорк, 1992. – С. 11-67
15. Изотов А. А., Зубинский В. И. и др. Основы спутниковой геодезии – М.: Недра, 1974. С. 5-49
16. Генике А. А., Побединский Г. Г. Глобальная спутниковая система определения местоположения GPS и ее применение в геодезии. – М.: Картгеоцентр-Геодезиздат, 1999. С. 99, 106-127.
17. Соловьев А. Ф. Основы космической геодезии. Методические указания – М.: ГУГК, 1988. С. 6-14.
18. Руководство по всемирной геодезической системе – 1984 (WGS-84). Doc 9674-AN/946. – ИКАО, 1997.
19. Использование за рубежом глобальных спутниковых систем для создания и развития координатной основы. – М.: ЦНИИГАиК, 1998.
20. Система геодезических параметров "Параметры Земли 1990 года" (ПЗ-90). – М., 1998. С. 9-13, 21, 25-31.
21. Неумивакин Ю.К., Перский М.И. Геодезическое обеспечение землеустроительных и кадастровых работ. М.: Картгеоцентр – Геоиздат, 1996. – 344 с.
22. Ahmed El-Rabbany Introduction to GPS. The Global Positioning System. 2002. – 193 p.

НАВЧАЛЬНЕ ВИДАННЯ

**Супутникова геодезія**

**Конспект лекцій**

Автор: Федір Терентійович Шумаков

Відповідальний за випуск: проф. В.Д. Шипулін

Редактор: М.З. Аляб'єв

Верстка: Ю.П. Степась

План 2009, поз. № 27 Л.

Підп. до друку 14.10.2009	Формат 60*80 1/16.	Папір офісний.
Друк на різнографі.	Ум овн.-друк. арк. 5,1	Обл.-вид. арк. 5,5
Тираж 50 прим.	Зам. №	

---

ХНАМГ, 61002, м. Харків, вул. Революції, 12

---

Сектор оперативної поліграфії ЦНІТ ХНАМГ

61002, м. Харків, вул.. Революції, 12